



**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**  
**Universidad del Perú. Decana de América**  
**Facultad de Ciencias Biológicas**  
**Escuela Académico Profesional de Ciencias Biológicas**

**Stocks de carbono y tipos de vegetación de los bosques  
húmedos de la Amazonia suroccidental del Parque  
Nacional del Manu, Perú**

**TESIS**

Para optar el Título Profesional de Biólogo con mención en  
Botánica

**AUTOR**

Jorge Armando CABALLERO ESPEJO

**ASESOR**

César Augusto ARANA BUSTAMANTE

Lima, Perú

2016



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

## Referencia bibliográfica

---

Caballero, J. (2016). *Stocks de carbono y tipos de vegetación de los bosques húmedos de la Amazonia suroccidental del Parque Nacional del Manu, Perú*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Biológicas, Escuela Académico Profesional de Ciencias Biológicas]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

---

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS  
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)

FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

ACTA DE SESIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE  
BIÓLOGO CON MENCIÓN EN BOTÁNICA  
(MODALIDAD: SUSTENTACIÓN DE TESIS)

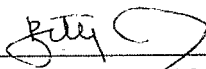
Siendo las ...9:10..... horas del 04 de julio de 2016, en el Salón de Grados de la Facultad de Ciencias Biológicas y en presencia del jurado formado por los profesores que suscriben, se dio inicio a la sesión para optar al Título Profesional de Biólogo con mención en **Botánica** de **JORGE ARMANDO CABALLERO ESPEJO**.

Luego de dar lectura y conformidad al expediente N° 075-EAPCB-2015, el titulando expuso su tesis: "**STOCKS DE CARBONO Y TIPOS DE VEGETACIÓN DE LOS BOSQUES HÚMEDOS DE LA AMAZONIA SUROCCIDENTAL DEL PARQUE NACIONAL DEL MANU, PERÚ**", y el Jurado efectuó las preguntas del caso calificando la exposición con la nota **.19.**, calificativo: **APROBADO SOBRESALIENTE CON MENCIÓN**

Finalmente, el expediente será enviado a la Escuela Académico Profesional de Ciencias Biológicas y al Consejo de Facultad para que se apruebe otorgar el Título Profesional de Biólogo con mención en **Botánica** a **JORGE ARMANDO CABALLERO ESPEJO** y se eleve lo actuado al Rectorado para conferir el respectivo título, conforme a ley.

Siendo las **.10:35.** horas se levantó la sesión.

Ciudad Universitaria, 04 de julio de 2016.

  
Dra. BETTY MILLÁN SALAZAR  
(PRESIDENTE)

  
Blgo. CESAR ARANA BUSTAMANTE  
(ASESOR)

  
Dr. MANUEL MARÍN BRAVO  
(MIEMBRO)

  
Mg. ENOC JARA PEÑA  
(MIEMBRO)



Para mis abuelos, que me inculcaron  
el amor por todos los seres vivos.

Agradezco a mis padres, Jorge II y Vicky, por haberme apoyado en este largo camino de mi vida profesional de manera incondicional, todos mis logros son gracias a ustedes, los amo.

A mis hermanos; Juan, Cesar, Diego y a mi hermana Maria, gracias por su apoyo y cariño. Con ustedes compartí alegrías y tristezas, y ahora comparto mis sueños volverse realidad.

También agradezco al Ing. Cesar Flores, a todo el personal del zoológico de San Diego y a la fundación Wallace por brindarme la oportunidad de conocer por primera vez un paraíso terrenal, llamado Cocha Cashu.

A la Dra. Patricia Alvarez-Loayza, por el enorme apoyo que me brindó a través del proyecto TEAM-network, por compartir sus conocimientos sobre la Amazonía suroccidental conmigo y por sus valiosos consejos para mi desarrollo profesional académico.

A los numerosos investigadores de Cocha Cashu, con quienes compartí momentos inolvidables. De manera especial quiero agradecer al Dr. John Terborgh, por sus sabias enseñanzas sobre los procesos ecológicos en Cocha Cashu y al Ing. Fernando Cornejo, quien me guio en el mundo de la taxonomía vegetal de Cocha Cashu.

A Ingrid y a los Machiguengas; Nicanor, Alvaro y Salomon con quienes recorrí kilómetros de selva virgen entre risas, charlas amenas, picaduras de zancudos y sudor. Fueron las mejores caminatas que haya tenido, muchas gracias.

A mi asesor el Blgo. Cesar Arana y a cada uno de los señores miembros de jurado por sus valiosas sugerencias, por su tiempo y por el apoyo durante el proceso que implica la revisión de la tesis.

Finalmente, agradezco al personal del SERNANP del Parque Nacional del Manu, quienes se encargan de proteger los bosques más biodiversos del planeta y uno de los últimos lugares donde aún viven los hombres en total armonía con la naturaleza.

## ÍNDICE GENERAL

Agradecimiento.....	V
Índice General.....	VII
Índice de Tablas y Figuras.....	IX
Índice de Anexos.....	XII
Resumen.....	XIII
1 INTRODUCCIÓN .....	1
2 MARCO TEÒRICO.....	4
2.1 VEGETACIÓN .....	4
2.1.1 Formaciones vegetales: .....	4
2.1.2 Tipos de Vegetación: .....	4
2.2 FUNDAMENTOS DE SENSORAMIENTO REMOTO .....	6
2.2.1 Radiación Electromagnética:.....	6
2.2.2 Espectro Electromagnético: .....	7
2.2.3 Datos Satelitales: .....	8
2.3 PLATAFORMAS SATELITALES Y SENSORES .....	8
2.3.1 Landsat .....	8
2.4 MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN.....	11
2.5 STOCK DE CARBONO SOBRE EL SUELO DEL PERÚ.....	13
3 OBJETIVOS.....	15
4 MATERIALES Y MÉTODOS .....	16
4.1 ÁREA DE ESTUDIO .....	16
4.2 DATOS IMÁGENES.....	19
4.3 PROCESAMIENTO DE DATOS IMÁGENES .....	21
4.3.1 Análisis de Tierra Firme y Planicie Aluvial (TF-PA): .....	21
4.3.2 Análisis de datos OLI: .....	22
4.3.3 Extracción de cuerpos de agua y digitalización de la Zona de Influencia de la Vegetación Riparia (ZIVSR):.....	26
4.4 CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE VEGETACIÓN DE LOS BHAS-PNM..	28

4.4.1	Árbol de Decisión: .....	30
4.5	PROCESAMIENTO POST-CLASIFICATORIO .....	32
4.5.1	Filtro de la imagen clasificada: .....	32
4.5.2	Suavizado de límites de clase y agrupamiento de imagen clasificada: ...	33
4.6	PRECISIÓN DE LA CLASIFICACIÓN .....	34
4.6.1	Puntos de control de campo e imágenes satelitales de alta resolución espacial: .....	34
4.6.2	Mediciones de Precisión: .....	37
4.6.3	Análisis categórico multivariado .....	38
4.7	ESTIMACIÓN DE STOCK DE CARBONO POR TIPO DE VEGETACIÓN ....	39
5	RESULTADOS.....	41
5.1	SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE VEGETACIÓN DE LOS BHAS-PNM.....	41
5.2	MAPA DE CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE VEGETACIÓN DE LOS BHAS-PNM.....	42
5.3	VALIDACIÓN DE LA CLASIFICACIÓN .....	46
5.4	CARBONO EN LOS TIPOS DE VEGETACIÓN .....	47
6	DISCUSIÓN .....	50
6.1	VALIDACIÓN DE LA CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE VEGETACIÓN DE LOS BHAS-PNM.....	50
6.2	CARBONO EN LOS TIPOS DE VEGETACIÓN .....	58
7	CONCLUSIONES .....	59
8	RECOMENDACIONES .....	60
9	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	61
10	ANEXOS.....	72

## ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

<b>Tabla 1.</b> Características Generales del proyecto Landsat. ....	9
<b>Tabla 2.</b> Tipos de Vegetación identificados en los bosques húmedos de la Amazonia suroccidental del Parque Nacional del Manu en un mosaico de imágenes OLI del Landsat-8. ....	28
<b>Tabla 3.</b> Matriz de confusión y cálculo del Índice Kappa. ....	46
<b>Tabla 4.</b> Media y desviación estándar de la estimación de densidad de carbono sobre el suelo y total de stock de carbono sobre el suelo en los tipos de vegetación de los bosques húmedos de la Amazonia suroccidental del Parque Nacional del Manu. SD = desviación estándar, Mg C ha <sup>-1</sup> = Megagramos de carbono por hectárea, Tg = Teragramo = un millón de toneladas métricas. ....	47
<b>Tabla 5.</b> Precisiones alcanzadas y proporción de puntos de referencia .....	51
<b>Tabla 6.</b> Índice Kappa y concordancia con la realidad. ....	52
<b>Tabla 7.</b> Comparación de la clasificación de los tipos de vegetación del presente estudio con el “Mapa Nacional de Cobertura Vegetal” .....	55
<b>Figura 1.</b> Influencia de la dinámica fluvial en la formación de los tipos de vegetación de la llanura amazónica.. ....	5
<b>Figura 2.</b> Radiación electromagnética.....	6
<b>Figura 3.</b> Espectro electromagnético .....	7
<b>Figura 4.</b> Longitudes de Onda de los sensores OLI y TIRS del Landsat 8, comparados con el sensor ETM+ del Landsat 7. ....	11
<b>Figura 5.</b> Ejemplo del transbordador espacial <i>Endeavour</i> colectando datos de elevación topográfica estereoscópica a través de dos reflectores de antenas de radar separadas por 60 metros (B=60).....	12
<b>Figura 6.</b> Ejemplo de datos de LiDAR aéreo colectados en la selva baja de la Amazonía por el Observatorio Aéreo Carnegie. ....	14
<b>Figura 7.</b> Ubicación del Área de estudio en el Parque Nacional del Manu. ....	18
<b>Figura 8.</b> Ubicación de los puntos de control de campo en la Estación Biológica de Cocha Cashu (EBCC) y el Puesto de Control y Vigilancia - Pakitza, Parque Nacional del Manu. ....	19

<b>Figura 9.</b> (a) Localización de las imágenes OLI Landsat-8 para el área de estudio: i) 4/68, ii) 4/69, iii) 3/69. (b) Localización de las imágenes satelitales de alta resolución en el área de estudio.....	20
<b>Figura 10.</b> (a) Imagen SRTM; tonos más oscuros indican menor elevación. (b) Pendiente; tonos más azules indican menor inclinación de la superficie respecto a la horizontal. (c) Resultado del análisis de contorno de la imagen SRTM corregida con la pendiente del área de estudio. Línea roja, indica el resultado de digitalización de las isolíneas de contorno de la planicie aluvial. ....	21
<b>Figura 11.</b> Pasos del procesamiento automático de las imágenes OLI Landsat-8 con CLASlite para la obtención de imágenes de cobertura fraccional. ....	22
<b>Figura 12.</b> Procesamiento de las imágenes OLI Landsat-8 con CLASlite. Las bandas 1,2 y 3 de la imagen de cobertura fraccional corresponden a la superficie descubierta o suelo (S), vegetación fotosintética (VF) y vegetación no fotosintética (VNF) respectivamente, con valores entre 0 a 100. ....	24
<b>Figura 13.</b> Digitalización manual de la Zona de Influencia de la Vegetación Riparia elaborado en base a la imagen de cobertura fraccional. ....	27
<b>Figura 14.</b> Árbol de decisiones usado para clasificar los tipos de vegetación de los bosques húmedos de la Amazonia suroccidental del Parque Nacional del Manu.....	32
<b>Figura 15.</b> Pasos del procesamiento post-clasificadorio. (a) Imagen clasificada bruta. (b) Imagen clasificada con filtro mayoritario. (c) Imagen clasificada con filtro mayoritario y refinado de límite.....	34
<b>Figura 16.</b> Identificación de los tipos de vegetación basados en imágenes satelitales de alta resolución. a.1) Aguajales densos o comunidades de <i>Mauritia flexuosa</i> , a.2) Identificación de poblaciones de <i>Mauritia flexuosa</i> a través del patrón estrellado de hojas del dosel, b) Pantanos en Sucesión Herbácea – Arbustiva, c) Bosque Sucesional Arbustiva – Arbórea o vegetación de complejo de orillares, d) Pantanos Herbáceos con Dominancia de Gramíneas. Línea amarilla delimita el tipo de vegetación. ....	36
<b>Figura 17.</b> Modelo de estimación de <i>stock</i> de carbono por tipo de vegetación. (a) Imagen clasificada (raster zonal). (b) Mapa de <i>stock</i> de carbono sobre el suelo (raster de valores de entrada). ....	40
<b>Figura 18.</b> Estructura del modelo de procesamiento de la información remota para la clasificación y estimación del <i>stock</i> de carbono sobre el suelo de los tipos de vegetación de los bosques húmedos de la Amazonia suroccidental del Parque Nacional del Manu.....	41

<b>Figura 19.</b> Mapa de tipos de vegetación de los bosques húmedos de la Amazonia suroccidental del Parque Nacional del Manu. Las clases identificadas fueron: PLA (playas), PHDG (Pantanos Herbáceos con Dominancia de Gramíneas), BSAA (Bosque Sucesional Arbustivo-Arbóreo, PSHA (Pantanos en Sucesión Herbáceo Arbustiva), ADOM (Aguajales Densos y Mixtos, o comunidades de <i>Mauritia flexuosa</i> asociados con otras especies), BMTI (Bosques Maduros de Terrazas Estacionalmente Inundables), VGCA (Vegetación de Gramíneas de Colinas de la Llanura Amazónica), BCLA (Bosques de Colinas de la Llanura Amazónica), AGU (Cuerpos de Agua).....	45
<b>Figura 20.</b> Porcentaje del tamaño de los tipos de vegetación de los bosques húmedos de la Amazonia suroccidental del Parque Nacional del Manu. ....	45
<b>Figura 21.</b> Correlación entre el tamaño de los tipos de vegetación de los bosques húmedos de la Amazonia suroccidental del Parque Nacional del Manu y el total de su almacenaje de carbono sobre el suelo. ....	48
<b>Figura 22.</b> Distribución de los <i>stocks</i> de carbono sobre el suelo de los bosques húmedos de la Amazonia suroccidental del Parque Nacional del Manu. ....	49
<b>Figura 23.</b> Puntos de verificación del Mapa Nacional de Cobertura Vegetal. Cuadro rojo muestra la localización del área de estudio.. ....	54
<b>Figura 24.</b> Comparación de la clasificación de los tipos de vegetación en ambos estudios. <b>a)</b> Tomado del “Mapa Nacional de Cobertura Vegetal” (MINAM, 2005), <b>b)</b> Presente estudio .....	57
<b>Figura 25.</b> Elevación en metros sobre el nivel del mar del Parque Nacional del Manu. ...	73
<b>Figura 26.</b> Pendiente en grados con respecto a la horizontal del Parque Nacional del Manu. ....	74
<b>Figura 27.</b> Densidad de Carbono sobre el suelo del Parque Nacional del Manu.....	75
<b>Figura 28.</b> Clasificación de Planicie Aluvial y Tierra Firme de los Bosques Húmedos de la Amazonia Suroccidental del Parque Nacional del Manu.....	77
<b>Figura 29.</b> Tipos de Vegetación de los Bosques Húmedos de la Amazonía Suroccidental del Parque Nacional del Manu. ....	78



## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo I: Mapas del Parque Nacional del Manu .....	72
Anexo II: Mapas de los Bosques Húmedos de la Amazonía Suroccidental del PNM.....	76
Anexo III: Datos de Puntos de Control de Campo .....	79

## RESUMEN

El diseño de los planes de conservación regional y la protección de áreas naturales empieza con la creación de mapas de vegetación. Sin embargo, muchos de los mapas de vegetación para la Amazonia carecen de precisión, limitando el desarrollo de estrategias efectivas y convincentes de conservación. En este estudio se usaron imágenes registradas por el sensor OLI del satélite Landsat-8, modelos de elevación digital (SRTM) y mapas temáticos de carbono, para identificar los patrones de vegetación y los stocks de carbono sobre el suelo de la Amazonía suroccidental del Parque Nacional del Manu. Primero se clasificaron los tipos de vegetación en siete clases dentro de dos unidades fisiográficas (tierra firme y planicie aluvial). Se usó el método de clasificación de árbol de decisiones empleando la topografía (pendiente, elevación) y datos de cobertura fraccional (VF, VNF y S) resultantes del procesamiento de las imágenes del sensor OLI, como datos de entrada. El mapa final fue evaluado tomando puntos de control de campo y puntos de referencia de imágenes satelitales de alta resolución. La precisión global del mapa de vegetación fue de 73% y el índice kappa (0.64) mostró una considerable correlación de la exactitud del mapa producido con la realidad. Por último, la estimación de carbono sobre el suelo mostró que los stocks más grandes se encuentran en los bosques de colinas de la llanura amazónica (tierra firme) y bosques maduros de tierras inundables (planicie aluvial), entre ambos comprenden el 97.6% del total de los stocks de carbono sobre el suelo de los siete tipos de vegetación evaluados. Nuestros resultados muestran que los datos SRTM e imágenes del sensor OLI del Landsat-8 pueden ser usados para mapear los bosques amazónicos suroccidentales con una considerable efectividad y con costos reducidos, por lo cual, llegan a ser útiles para los planes de protección y conservación.

**Palabras claves:** OLI, Landsat 8, SRTM, vegetación, carbono sobre el suelo, Parque Nacional del Manu.

## 1 INTRODUCCIÓN

La Amazonia peruana es un ambiente muy peculiar y aunque aparentara un espacio relativamente homogéneo, en ella existe una variabilidad ambiental muy grande. Muchas de estas variaciones ambientales reflejan la contribución de factores climáticos, geológicos, pedológicos e hidrológicos (Kalliola *et al.*, 1993; Räsänen, 1993; Tuomisto *et al.*, 1995; BIODAMAZ, 2004a).

Estos factores determinan la existencia de distintos tipos de vegetación, presentándose patrones de distribución muy particulares (Gentry, 1982; Foster *et al.*, 1986; Salo *et al.*, 1986; Foster, 1990a, b; Phillips *et al.*, 2003; ter Steege *et al.*, 2006). Mucha de esta variabilidad se puede distinguir en imágenes satelitales, las cuales reflejan diferencias y patrones en la cobertura vegetal de una determinada ecorregión (Tuomisto 1993; Tuomisto *et al.*, 1995; Gond *et al.*, 2011; BIODAMAZ, 2004a, b; Salovaara *et al.*, 2005).

La ecorregión de los bosques húmedos de la Amazonia suroccidental, conocida coloquialmente como selva baja o llanura amazónica, es un área que contiene un ensamblaje geográficamente diferenciado de comunidades naturales que comparten una gran mayoría de sus especies y su dinámica ecológica, comparte condiciones ambientales similares e interaccionan ecológicamente en formas que son críticas para su preservación a largo plazo (Olson *et al.*, 2001; Abell *et al.*, 2008).

Esta ecorregión representa aproximadamente el 66% del área del Parque Nacional del Manu, asimismo, dentro de su espacio se encuentra la mayor diversidad de flora y fauna y contiene los mayores depósitos de carbono almacenado de toda el área protegida (Gentry, 1982; Gentry, 1988b; Phillips *et al.*, 1994; TEAM-network, datos no publicados; Malhi *et al.*, 2004; Peacock *et al.*, 2007).

La adecuada gestión y conservación de las áreas naturales protegidas, como el Parque Nacional del Manu, empieza con el conocimiento de la riqueza y distribución de sus ecosistemas. Por lo tanto, es indispensable contar con mapas exactos que muestren los patrones de vegetación. De igual manera es importante entender la geografía de los stocks de carbono de los bosques, ya que su conocimiento ayuda en la generación de estimaciones espacialmente explícitas de emisiones de carbono en el tiempo (Asner, 2009; Asner *et al.*, 2010; Saatchi *et al.*, 2011). Además, resulta importante para el entendimiento de numerosos patrones y procesos ecológicos, como por ejemplo, los bosques húmedos de la Amazonia suroccidental del Parque Nacional del Manu, almacenan los mayores stocks de carbono sobre el suelo en grandes árboles, que también proveen hábitat crítico para miles de aves, mamíferos e invertebrados (Lindenmayer *et al.*, 2012), mientras que bajos stocks de carbono son indicativos de limitaciones climáticas e hidrológicas para la productividad, así como la mortalidad del dosel del bosque a causa de perturbaciones (Lugo & Scatena, 1996; Phillips *et al.*, 2009; Phillips *et al.*, 2010; Asner, 2013).

El estudio de la distribución de los tipos de vegetación y el stock de carbono que almacenan, se encuentra limitado por numerosos factores abióticos intrínsecos (clima, suelos, geología, topografía, hidrología) y bióticos (composición de las comunidades) (Anderson *et al.*, 2009). Además, las técnicas de muestro de campo no reflejan la variabilidad espacial de los patrones de vegetación ni los stocks de carbono en grandes regiones y las estimaciones resultantes de las emisiones de carbono basadas en parcelas de campo son altamente vulnerables a errores (Asner *et al.*, 2014). Finalmente, las mediciones adquiridas, de la estructura de la vegetación (alto de los árboles, diámetro), con muestreos de campo, requieren ecuaciones alométricas para estimar los stocks de carbono sobre el suelo (Chave *et al.*, 2005). Este proceso es propenso a un sesgo sistemático, particularmente con respecto a controles florísticos

sobre los stocks de carbono, tales como la arquitectura de la corona y densidad de la madera (Clark & Kellner, 2012).

Ante la necesidad de desarrollar nuevos métodos de estudio; menos costosos, más rápidos y en mayores campos espaciales, se presenta el siguiente trabajo que tiene por finalidad analizar la clasificación, distribución y los stocks de carbono sobre el suelo de los tipos de vegetación de la Amazonía suroccidental del Parque Nacional del Manu, empleando información remota y de campo. El conocimiento generado en este estudio servirá para la gestión y manejo de los bosques y como base, para los futuros acuerdos de cumplimiento o de mercado sobre secuestro de carbono en áreas naturales protegidas.

## 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 VEGETACIÓN

En un sentido amplio, es la cobertura verde de la tierra. Sin embargo, la vegetación es un concepto funcional y dinámico ligado a las características y condiciones ambientales determinadas por el substrato, la topografía, el clima, la latitud y la altitud, las cuales definen la predominancia de una forma vegetal (BIODAMAZ, 2004a).

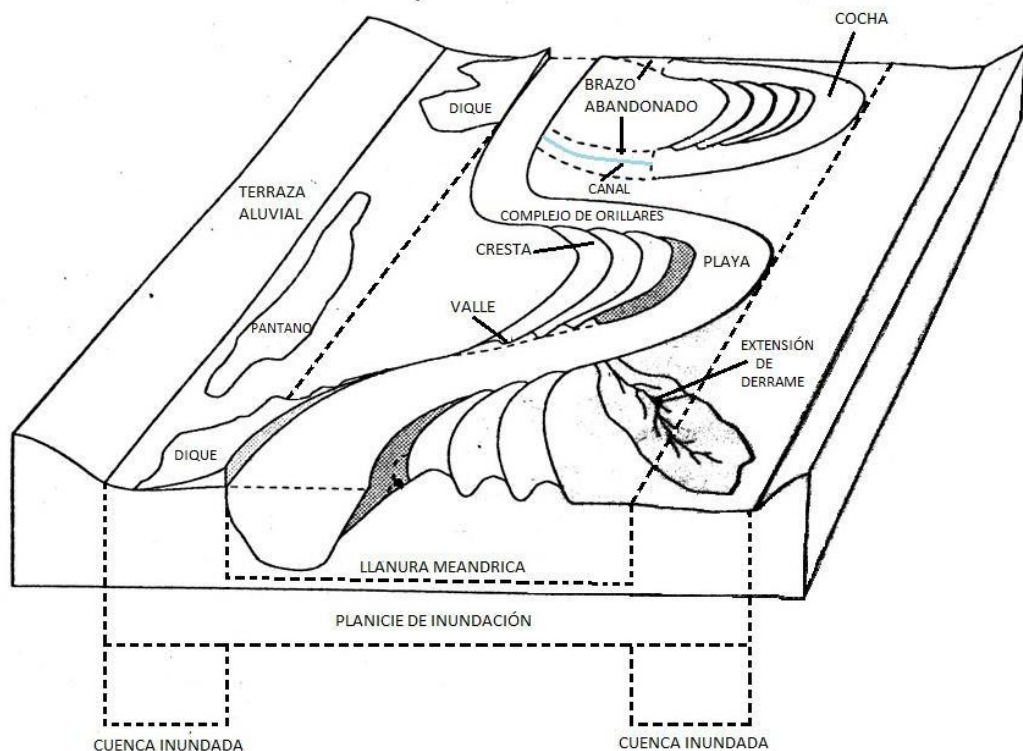
#### *2.1.1 Formaciones vegetales:*

Las formaciones vegetales son unidades fisionómicas que contienen un número de asociaciones o comunidades florísticas, las que están unidas por estructuras o formas de vida comunes (Beard, 1946; Shimwell, 1971). Particularmente, Shimwell (1971) señala que la formación comprende a un grupo de comunidades de una sola región o continente, de fisionomía similar y relacionada con las condiciones climáticas y ambientales. En ecología, se denomina formación vegetal a las comunidades de plantas que presentan una similitud fisionómica, pese a las diferencias en composición florísticas (BIODAMAZ, 2004a). Es decir, las formaciones vegetales son unidades geográficamente amplias de comunidades vegetales restringidas a determinadas condiciones climáticas y ambientales en las dimensiones espacio-temporal (p.ej. bosques, prados, chaparrales, estepas, etc.).

#### *2.1.2 Tipos de Vegetación:*

Teniendo en cuenta el alcance de las formaciones vegetales y de vegetación, se define a los tipos de vegetación como unidades de carácter más local, debido a factores geológicos, geomorfológicos, edáficos, de dinámicas fluviales e hidrográficas, climáticos y de las influencias humanas. La variedad de tipos de vegetación se presentará según la escala de análisis o estudio (Braun-Blanquet, 1979).

La Amazonia, siendo una extensa formación vegetal, está conformada por diferentes tipos de vegetación, las que a su vez están compuestas y ensamblados por diferentes especies, las cuales se encuentran espacialmente restringidas por factores ambientales como; relieve, inundación, contenido de nutrientes y drenaje. Como, por ejemplo; la dinámica fluvial, a través del proceso de erosión y sedimentación, modifica el relieve terrestre lo cual genera que la vegetación en zonas inundables sea diferente a los de tierra firme o terraza aluvial, de buen drenaje, tanto en la composición como en la riqueza y abundancia de especies (Figura 1) (Huber, 1906; Balslev *et al.*, 1987; Duivenvoorden & Lips, 1995; Grández *et al.*, 2001).



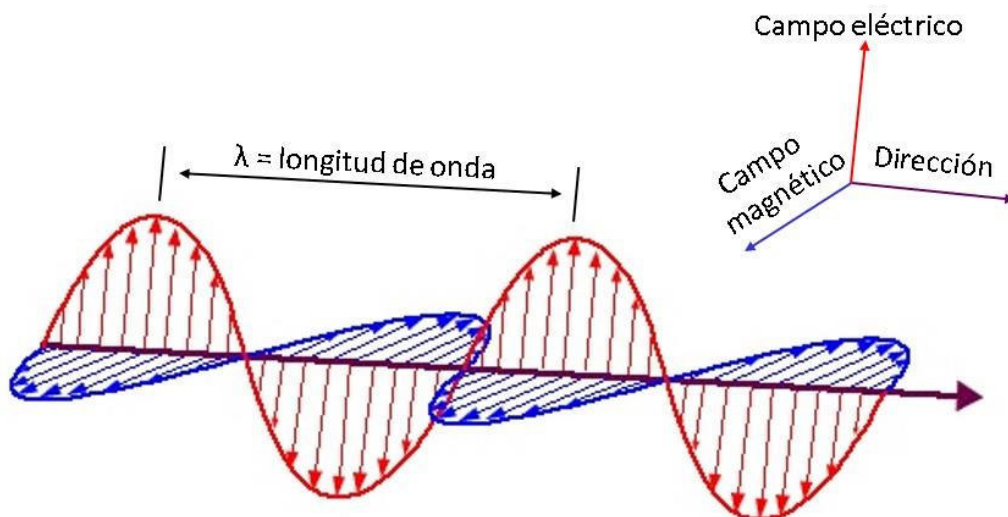
**Figura 1.** Influencia de la dinámica fluvial en la formación de los tipos de vegetación de la llanura amazónica. Fuente: Kalliola & Puhakka, 1993.

## 2.2 FUNDAMENTOS DE SENSORAMIENTO REMOTO

El término de sensoramiento remoto se refiere a la tecnología de adquisición de información de la superficie terrestre (suelo y agua) y la atmosfera, usando sensores colocados a bordo de plataformas de transporte aéreo (aviones, globos aéreos, drones) o transporte espacial (satélites, transbordadores espaciales) sin entrar en contacto con los objetos o eventos observados (NUS, 2002).

### 2.2.1 Radiación Electromagnética:

Los sensores sobre las plataformas de transporte aéreo o espacial registran radiación electromagnética, energía transportada a través del espacio en forma de un campo eléctrico perpendicular a otro campo magnético (NUS, 2002). Estas ondas electromagnéticas viajan a la velocidad de la luz, transportando cantidades discretas de energía (cuantos) y se caracterizan por poseer una frecuencia y una longitud de onda ( $\lambda$ ) (Figura 2).

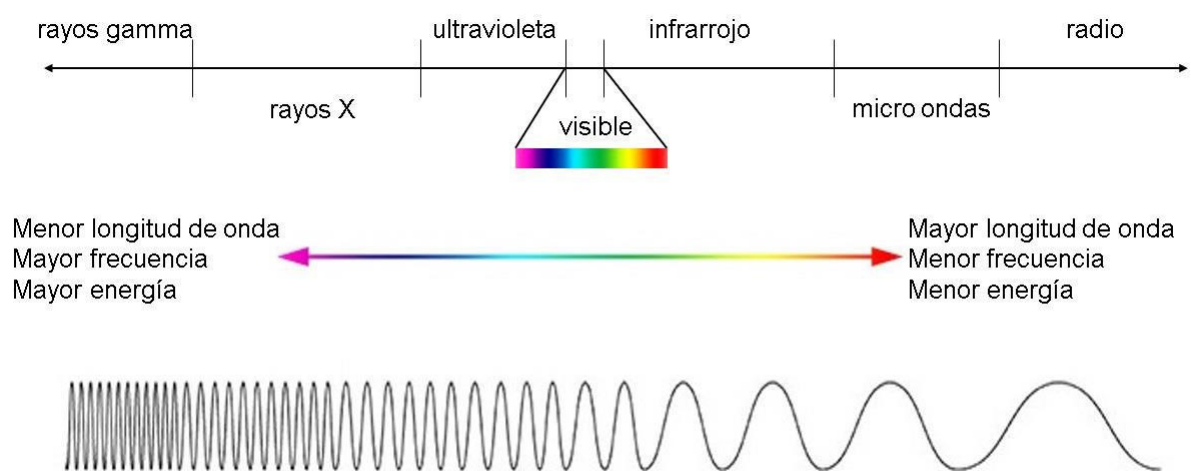


**Figura 2.** Radiación electromagnética (Fuente: NDT Resource center)



### 2.2.2 Espectro Electromagnético:

El espectro electromagnético es el rango de todos los tipos de radiación electromagnética (Figura 3). Esta abarca desde la luz visible que se produce en una lámpara y las ondas de radio que se generan en una estación de radio hasta las microondas, luz infrarroja, luz ultravioleta, rayos x y rayos gamma. Las longitudes de onda que generalmente son más empleadas son la región visible e infrarrojo cercano entre 400 nm y 1  $\mu\text{m}$ .



**Figura 3.** Espectro electromagnético (Fuente: NASA, Imagine el universo)

Cuando la radiación interactúa con la materia (cuerpos de agua, tipos de vegetación, tipos de rocas, etc.) algunas longitudes de onda son absorbidas, dándole una firma distinguible de otra a lo largo del espectro, mientras que otras son reflejadas. Es la radiación reflejada de la superficie terrestre, la cual es captada por los sensores remotos, y transformada a valores digitales para ser utilizada en el estudio de la vegetación, suelos, agua y otras coberturas terrestres (Chuvieco, 1996).

### 2.2.3 Datos Satelitales:

Son representaciones bidimensionales de parte de la superficie terrestre vistas desde el espacio. Estos son datos digitales y consisten de un arreglo matricial bidimensional de filas y columnas (imágenes raster) donde cada pixel representa un área geográfica de la superficie terrestre (BIODAMAZ, 2004b). Un pixel tiene un valor de intensidad y una ubicación en la imagen.

El valor de intensidad representa la cantidad física de la radiación solar medida en una longitud de onda (banda) dada reflejada desde la tierra, radiación infrarroja emitida o reflejo de intensidades de radar. Normalmente, este valor es el promedio del área total cubierta por el píxel. La intensidad de un píxel es obtenida y registrada como un número digital.

La ubicación de un píxel se expresa usando un sistema de coordenadas. Cada ubicación en la matriz está expresada como un par de coordenadas X e Y. La coordenada X especifica la columna de la matriz, y la coordenada Y se refiere a la fila.

## 2.3 PLATAFORMAS SATELITALES Y SENSORES

### 2.3.1 Landsat

Los sistemas de sensores ópticos de órbita polar *Landsat* (MSS, TM, ETM+ y OLI-TIRS) han sido ampliamente utilizados para el monitoreo de la superficie de la tierra con un record único de más de 42 años de data existente hasta la actualidad. Poseen una gran resolución espacial, espectral y temporal (ver tabla 1) y los datos han sido utilizados por una amplia variedad de sectores; público, privado y aplicaciones de seguridad nacional. Algunos ejemplos incluyen su uso para el manejo de recursos hídricos, investigaciones de cambio climático, explotaciones de minería y petróleo, agricultura, monitoreo de contaminación, detección de cambio de uso de suelo y mapeo cartográfico.

**Tabla 1.** Características Generales del proyecto Landsat. Fuente: Williams, 2004.

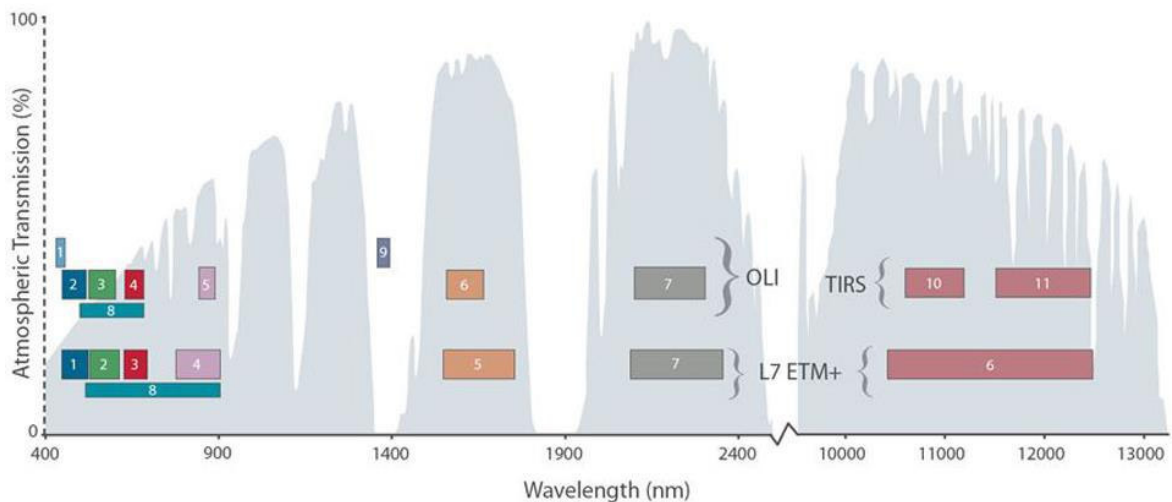
Satélite	Lanzamiento (fin servicio)	Altitud (km)	Periodicidad (días)	Sensor	Banda: intervalo espectral (µm)	Resolución espacial (m)
Landsat 1	23/07/72 06/01/78	917	18	RBV	(1) 0.48 0.57 (2) 0.58 0.68 (3) 0.70 0.83	80 80 80
				MSS	(4) 0.5 0.6 (5) 0.6 0.7 (6) 0.7 0.8 (7) 0.8 1.1	79 79 79 79
Landsat 2	22/01/75 25/02/82	917	18	Idéntico al Landsat 1		
Landsat 3	05/03/78 31/03/83	917	18	RBV	(1) 0.5 0.75	40
				MSS	(4) 0.5 0.6 (5) 0.6 0.7 (6) 0.7 0.8 (7) 0.8 1.1 (8) 10.4 12.6	79 79 79 79 240
Landsat 4	16/07/82 (83)	705	16	MSS	(4) 0.5 0.6 (5) 0.6 0.7 (6) 0.7 0.8 (7) 0.8 1.1	82 82 82 82
				TM	(1) 0.45 0.52 (2) 0.52 0.60 (3) 0.63 0.69 (4) 0.76 0.90 (5) 1.55 1.75 (6) 10.4 12.5 (7) 2.08 2.35	30 30 30 30 30 60 30
Landsat 5	Idéntico al Landsat 4					
Landsat 6	05/10/93 05/10/93	705	16	Fallas en el sistema		
Landsat 7	15/04/99	705	16	ETM+	(1) 0.441 0.514 (2) 0.519 0.601 (3) 0.631 0.692 (4) 0.772 0.898 (5) 1.547 1.749 (6) 10.31 12.36 (7) 2.064 2.345 (8) 0.515 0.896	30 30 30 30 30 60 30 15 PAN
Landsat 8	11/02/2013	705	16	OLI	(1) 0.435 0.451 (2) 0.452 0.512 (3) 0.533 0.590 (4) 0.636 0.673 (5) 0.851 0.879 (6) 1.566 1.651 (7) 2.107 2.294 (8) 0.503 0.676 (9) 1.363 1.384	30 30 30 30 30 60 30 15 PAN 30
				TIRS	(10) 10.60 11.19 (11) 11.50 12.51	100 100

El satélite de observación terrestre Landsat 8 fue lanzado el 11 de febrero del 2013, como un proyecto de colaboración entre la NASA y el *United States Geological Survey* (USGS). Provee imágenes de mediana resolución espacial, desde los 15 metros hasta los 100 metros, de la superficie terrestre y regiones polares. Landsat 8 opera en los espectros; visible, infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta e infrarrojo termal. Captura aproximadamente 400 escenas por día y cuenta con dos sensores: *Operational Land Imager* (OLI) y el *Thermal InfraRed Sensor* (TIRS).

El sensor OLI colecta data de nueve bandas espectrales. Siete de las nueve son consistentes con los sensores *Thematic Mapper* (TM) y *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) presentes en los anteriores satélites Landsat, proveyendo compatibilidad con los datos históricos, así como también mejorando las capacidades de medición. Dos nuevas bandas espectrales, una banda visible azul profunda (Banda 1) específicamente diseñado para recursos hídricos e investigación de zonas costeras y una nueva banda infrarroja (Banda 9) para la detección de las nubes cirrus, permiten medir la calidad del agua y mejoran la detección de nubes altas y pequeñas (Figura 4).

El sensor TIRS, construido por la NASA *Goddard Space Flight Center*, captura imágenes térmicas y apoya aplicaciones emergentes como la medición de tasas de evapotranspiración para el manejo del agua. El plano focal del TIRS usa *GaAs Quantum Well Infrared Photodetector arrays* (conocido como QWIPS) para la detección de radiación infrarroja, la primera para el programa Landsat. El TIRS colecta en dos bandas espectrales para la longitud de onda colectada por una única banda en los anteriores sensores TM y ETM+.

La calidad de data (proporción señal/ruido) y cuantificación radiométrica (12-bits) del OLI y TIRS es más alta que los anteriores instrumentos Landsat (8-bit para TM y ETM+), proporcionando una mejora significativa en la capacidad de detectar cambios en la superficie terrestre.



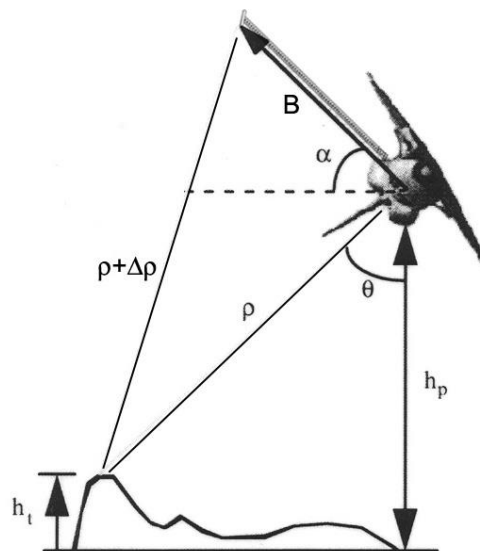
**Figura 4.** Longitudes de Onda de los sensores OLI y TIRS del Landsat 8, comparados con el sensor ETM+ del Landsat 7. Fuente: [http://landsat.usgs.gov/L8\\_band\\_combos.php](http://landsat.usgs.gov/L8_band_combos.php)

## 2.4 MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN

El *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) fue un proyecto de colaboración entre la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) y la *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA). SRTM colectó datos radares interferométricos, los cuales han sido usados por el *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) para generar datos topográficos en latitudes menores a 60°. Los datos producidos brindan, desde el 2014, la mayor resolución de modelo digital de elevación de la Tierra (1 arc-sec o aproximadamente 30 metros) (Rodríguez *et al.*, 2005).

La emergencia, en los 1990's, del radar de apertura sintética (SAR, *Synthetic Aperture Radar*) posibilitaron la creación de un modelo de elevación digital global. Interferometría SAR, o InSAR, hace uso de las mediciones de desfase derivada de dos imágenes radar para medir la topografía.

Para adquirir los datos de elevación topográfica estereoscópica el SRTM llevaba dos reflectores de antenas de radar. Cada reflector-antena estaba separado 60 metros (Figura 5). La técnica empleada conjuga *software* interferométrico con SAR radares con anchos sintéticos en sus antenas reflectoras.



**Figura 5.** Ejemplo del transbordador espacial *Endeavour* colectando datos de elevación topográfica estereoscópica a través de dos reflectores de antenas de radar separadas por 60 metros ( $B=60$ ). Fuente: Rodríguez *et al.*, 2005.

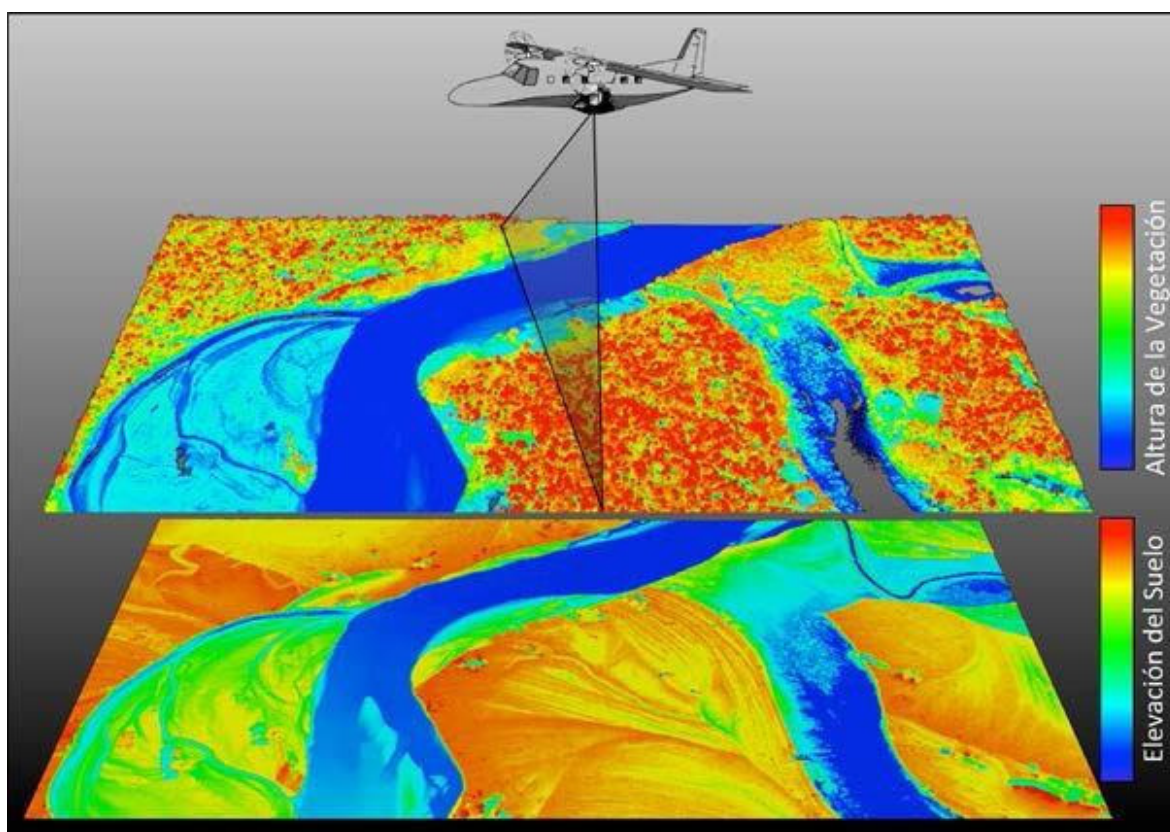
La precisión se obtiene por la medición cuidadosa de la longitud de la línea de base, la orientación y la ubicación de la plataforma con relación al sistema de coordenadas de referencia. Como las longitudes de onda de radar en el rango cm a m proporcionan buenas señales de retorno de superficies rugosas como suelo desnudo, aguas turbulentas, y la vegetación, éstas superficies son las que están representadas por el DEM. En particular, los doseles de vegetación muy cerrados no pueden ser penetrados de manera significativa y el mapa topográfico no corresponderá a la superficie del suelo en esas áreas. Además, las superficies lisas como aguas tranquilas y sabanas de arena no pueden dispersar suficiente energía de radar de nuevo al sensor y por lo tanto no puede producir una alta medición.

Finalmente, las aplicaciones de datos de sensoramiento remoto, y en particular de Imágenes OLI-Landsat 8 y de SRTM, modelo de elevación digital, ofrecen oportunidades de investigación en la Amazonia. Estos datos son accesibles sin costo, cubren grandes áreas con pocos datasets, y ofrecen una cobertura global (Rodríguez *et al.*, 2006; Tucker *et al.*, 2004). Además, los patrones en imágenes Landsat son conocidos por corresponder a patrones florísticos en los bosques Amazónicos (Hill &

Footy, 1994; Salovaara *et al.*, 2005; Thessler *et al.*, 2005; Tuomisto *et al.*, 2003; Tuomisto & Ruokolainen, 2001; Tuomisto *et al.*, 1995; Ruokolainen & Tuomisto, 1998); y patrones en imágenes SRTM pueden ser usados para inferir patrones geológicos y topográficos (Higgins *et al.*, 2011). Brindando una relación entre patrones geológicos y florísticos en los bosques Amazónicos. Por lo tanto, la combinación de imágenes satelitales y datos de campo ofrecen la posibilidad de mapear grandes extensiones de bosques amazónicos, con una modesta inversión de tiempo, personal y financiamiento (Higgins *et al.*, 2011; Salovaara *et al.*, 2005; Thessler *et al.*, 2005).

## **2.5 STOCK DE CARBONO SOBRE EL SUELO DEL PERÚ**

En el año 2014, en un trabajo conjunto entre el Observatorio Aéreo Carnegie y el Ministerio del Ambiente del Perú, se desarrolló el primer estudio geográfico de alta resolución de los stocks de carbono sobre el suelo del Perú. En este, se muestra un mapa resultante de carbono en alta resolución del Perú y también se ofrece el primer análisis cuantitativo de los factores ambientales básicos que determinan la geografía del carbono en los ecosistemas, regiones políticas y áreas naturales protegidas del Perú. El enfoque combina datos satelitales disponibles gratuitamente y series de datos de sistemas de información geográfica (SIG) con una resolución de una hectárea, con datos de tecnología LiDAR (*Light Detection and Ranging*, Detección y Medición con Luz), información de redes de parcelas de campo para calibración y técnicas geoestadísticas de escala, en un marco de modelaje para desarrollar mapas de densidad de carbono sobre el suelo (en unidades de  $\text{Mg C ha}^{-1}$  = toneladas métricas de carbono por hectárea) con estimaciones de incertidumbre espacialmente explícita (Asner *et al.*, 2014).



**Figura 6.** Ejemplo de datos de LiDAR aéreo colectados en la selva baja de la Amazonía por el Observatorio Aéreo Carnegie. Fuente: La Geografía del Carbono en Alta Resolución del Perú; Informe Conjunto del Observatorio Aéreo Carnegie y el Ministerio del Ambiente del Perú.

La tecnología clave en la estimación de los stocks de carbono a nivel nacional fue el empleo de sensores LiDAR aéreo, los cuales emiten pulsos de luz láser en el infrarrojo cercano, aproximadamente entre 900 y 1100 nanómetros. Cada pulso laser se envía y retorna a un sensor LiDAR a bordo de una aeronave, escaneando de lado a lado a medida que vuela hacia adelante, creando una cobertura espacial en 2-D. Esta es capaz de atravesar el follaje de la vegetación del dosel hasta el suelo. Además, la interacción del láser con el follaje del dosel permite que parte de esta retorne al sensor LiDAR, favoreciendo así la medición del perfil vertical del estrato arbóreo. Esta interacción se digitaliza y se usa para mapear la altura de la vegetación y la elevación del suelo (Figura 6).



### **3 OBJETIVOS**

#### **Objetivo General**

- Caracterizar, mapear y cuantificar los stocks de carbono de los tipos de vegetación dentro de los bosques húmedos de la Amazonia suroccidental del Parque Nacional del Manu.

#### **Objetivos específicos**

- Desarrollar un sistema de clasificación de los tipos de vegetación de los bosques húmedos de la Amazonia suroccidental del Parque Nacional del Manu en base a modelos de elevación digital y valores de cobertura fraccional de imágenes del sensor OLI del Landsat-8.
- Determinar el tamaño y la representatividad de los tipos de vegetación de los bosques húmedos de la Amazonia suroccidental del Parque Nacional del Manu.
- Cuantificar el stock de carbono por cada tipo de vegetación de los bosques húmedos de la Amazonia suroccidental del Parque Nacional del Manu en el año 2014.
- Comparar los stocks de carbono entre los tipos de vegetación de los bosques húmedos de la Amazonia suroccidental del Parque Nacional del Manu en el año 2014.

## **4 MATERIALES Y MÉTODOS**

### **4.1 ÁREA DE ESTUDIO**

El área de estudio corresponde a la ecorregión de los Bosques Húmedos de la Amazonia Suroccidental del Parque Nacional del Manu (BHAS-PNM) (Figura 7), se localiza en la selva suroriental del Perú, en la región de Madre de Dios, provincia de Manu y el distrito de Fitzcarrald. Abarca una superficie de 1' 136 866.93 ha, constituyendo el 66,2% del área del Parque Nacional del Manu, y se encuentra entre las coordenadas: 11°51'23"S y 71°43'17"O.

La precipitación media anual es aproximadamente 2100 mm (10 años media), de la cual el 86% ocurre durante la estación lluviosa (octubre a mayo). La temperatura media anual, medida bajo el dosel arbóreo, es de 24°C, con records extremos de 8°C y 34°C (Terborgh, 1983).

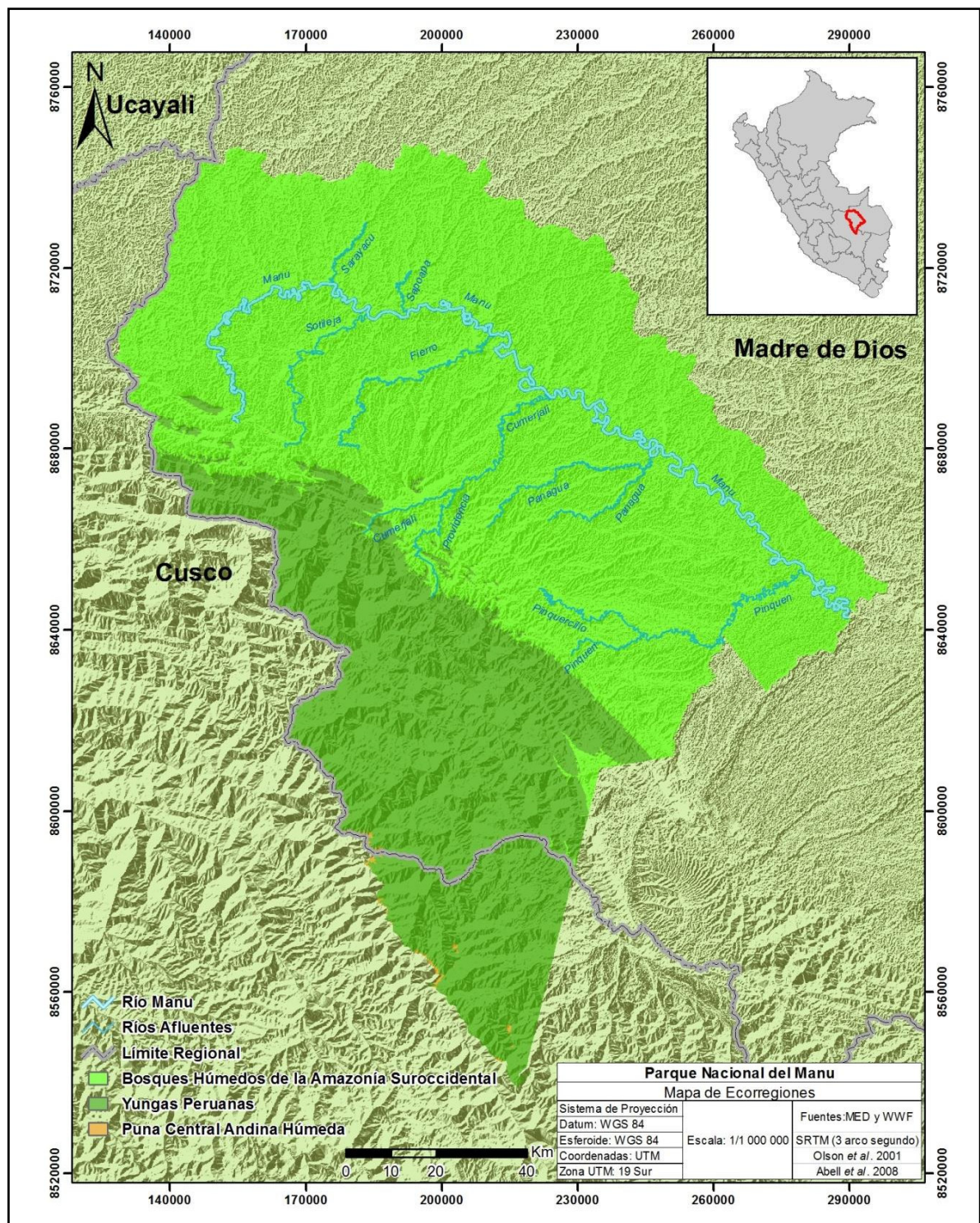
La clasificación de la ecorregión de los bosques húmedos de la Amazonia suroccidental desarrollada por el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF por sus siglas en Ingles) se caracteriza por un paisaje relativamente plano con planicies aluviales, colinas y terrazas altas. En el Parque Nacional del Manu esta región se extiende hasta alcanzar los 600-650 m de altitud (SERNANP, 2013) y la fisiografía que presenta incluye; bosques de tierra firme no inundable con suelos pobres en nutrientes, antiguas planicies aluviales en suelos ricos y planicies inundables estacionalmente con comunidades sucesionales de tipo arbustivo-arbóreo en las dimensiones laterales de los ríos.

El río Manu es la principal cuenca que recorre los BHAS-PNM de norte a sureste. En este desembocan más de 100 tributarios a lo largo de su recorrido, siendo los ríos; Pinken, Panagua, Cumerjali, Fierro, Sotileja, Sarayacu y Sapoapa sus principales afluentes.

En base a la caracterización físico-ambiental del plan maestro del Parque Nacional del Manu (2013-2018), los BHAS-PNM están comprendidos en la unidad morfo-estructural denominada: llanura alta de Madre de Dios, diferenciada por su desarrollo orogénico, altitud, relieve y estructuras. Los BHAS-PNM limitan al norte con el arco del Fitzcarrald, por el sur y suroeste con el geoanticlinal andino y hacia el oeste con el escudo brasileño. El arco de Fitzcarrald y el geoanticlinal andino constituyen elementos tectónicos positivos que proporcionan los sedimentos actuales.

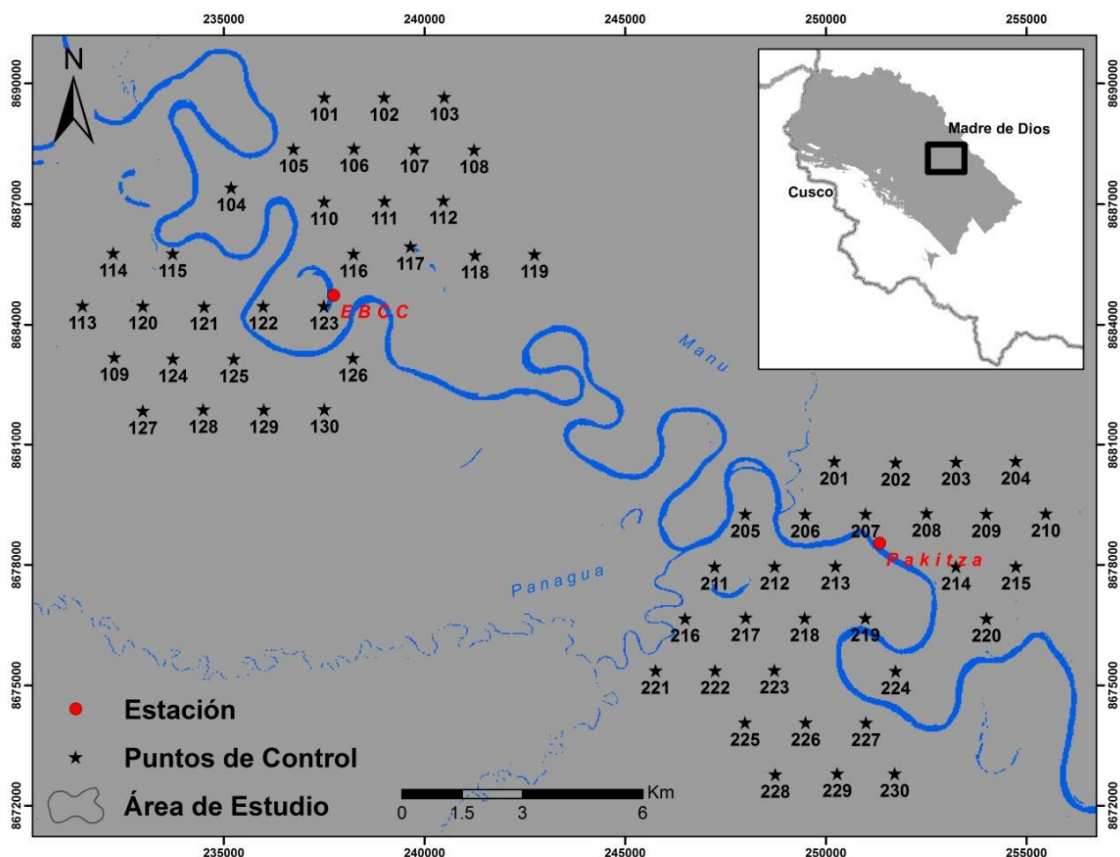
Por otro lado, los BHAS-PNM son caracterizados dentro de la unidad fisiográfica de paisaje de llanura amazónica, cuya extensión se distribuye entre los 279 - 650 m.s.n.m. Esta unidad fisiográfica presenta tierras planas con pendientes de 0 a 5% y está conformada por material aluvial y coluvio-aluvial cubierto por una densa y variada vegetación húmedo tropical (SERNANP, 2013).

Para esta investigación se colectó información remota y datos de campo para el área de estudio. Los datos de campo se registraron en los alrededores del puesto de control y vigilancia de Pakitza (PCV-Pakitza) del Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SERNANP) y de la estación biológica de Cocha Cashu (EBCC) (Figura 8). Para acceder a estas estaciones se realiza un viaje desde la ciudad de Cusco al puerto de Atalaya por carretera durante 8 horas (la carretera es pavimentada hasta Paucartambo, 4 horas desde Cusco). Después por bote navegando el río Alto Madre de Dios, desde Atalaya al pueblo de Boca Manu (a 2.7 km al este de la desembocadura del río Manu en el Alto Madre de Dios) por un trayecto de 6 - 7 horas. Finalmente, se navega el río Manu, un total de 108.7 km desde su desembocadura al río Alto Madre de Dios hasta el PCV-Pakitza y 33.4 km más desde el PCV-Pakitza hasta la EBCC.



**Figura 7.** Ubicación del Área de estudio en el Parque Nacional del Manu.

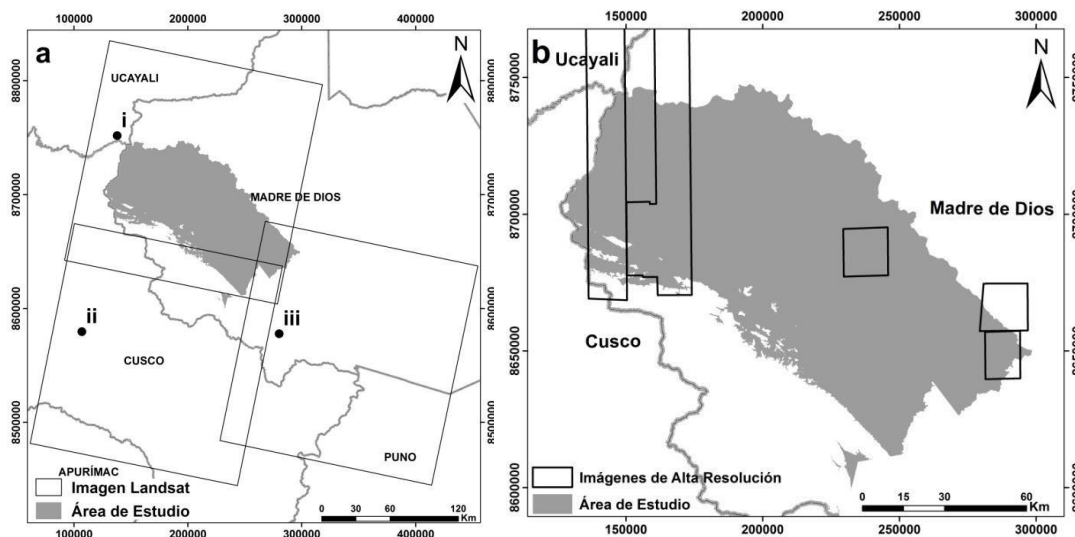




**Figura 8.** Ubicación de los puntos de control de campo en la Estación Biológica de Cocha Cashu (EBCC) y el Puesto de Control y Vigilancia - Pakitza, Parque Nacional del Manu.

## 4.2 DATOS IMÁGENES

Se descendieron datos SRTM, archivo SRTM\_22\_15, para el área de estudio, desde el servidor CGIAR-CSI (*The CGIAR Consortium for Spatial Information*). Asimismo, imágenes registradas por el sensor *Operational Land Imager (OLI)* del satélite Landsat-8; i) 4/68, ii) 4/69 iii) 3/69 (Figura 9a) fueron descendidos desde el servidor Glovis, *Global Visualization Viewer-USGS*. Los datos Landsat fueron seleccionados entre los meses de junio – octubre, caracterizada por ser una estación de baja precipitación en la Amazonia sur peruana (Kalliola & Puhakka, 1993) entre los años 2013-2014, dentro de los departamentos de Cusco y Madre de Dios. Todas las imágenes con cobertura nubosa entre 0 a 50%, o sin ninguna cobertura nubosa para el área de estudio.



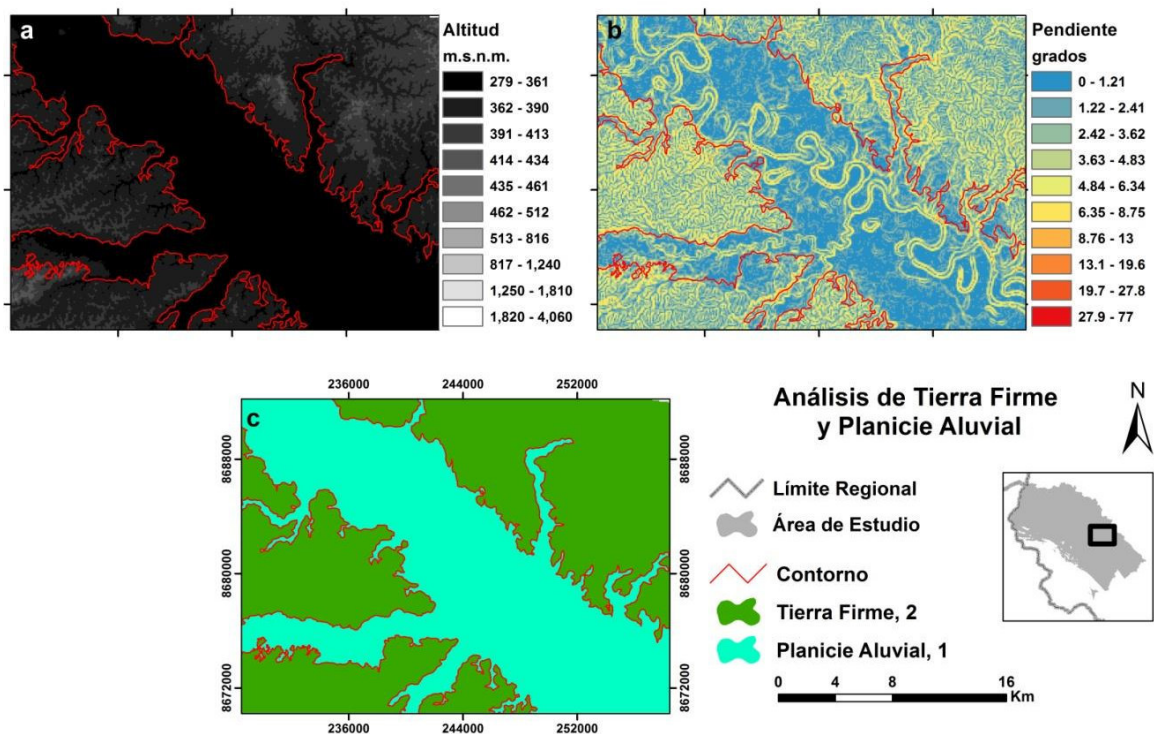
**Figura 9.** (a) Localización de las imágenes OLI Landsat-8 para el área de estudio: i) 4/68, ii) 4/69, iii) 3/69. (b) Localización de las imágenes satelitales de alta resolución en el área de estudio.

Imágenes satelitales de alta resolución espacial fueron seleccionadas para el área de estudio (Figura 9b). Una imagen satelital *GeoEye-1* fue adquirida el primero de mayo del 2012 por el zoológico de San Diego. Esta abarca un área total de 120.8 km<sup>2</sup> sobre la estación biológica de Cocha Cashu (EBCC) y presenta una resolución espacial de 0.5 metros. La cobertura nubosa es de cero por ciento y el rango espectral es de cuatro bandas en el sensor multiespectral (azul, verde, rojo e infrarojo cercano) y una banda en el pancromático. Otras imágenes disponibles en *Google Earth Pro* (p.ej. Quickbird, IKONOS) también fueron evaluadas para la interpretación de la cobertura de la vegetación.

### 4.3 PROCESAMIENTO DE DATOS IMÁGENES

#### 4.3.1 Análisis de Tierra Firme y Planicie Aluvial (TF-PA):

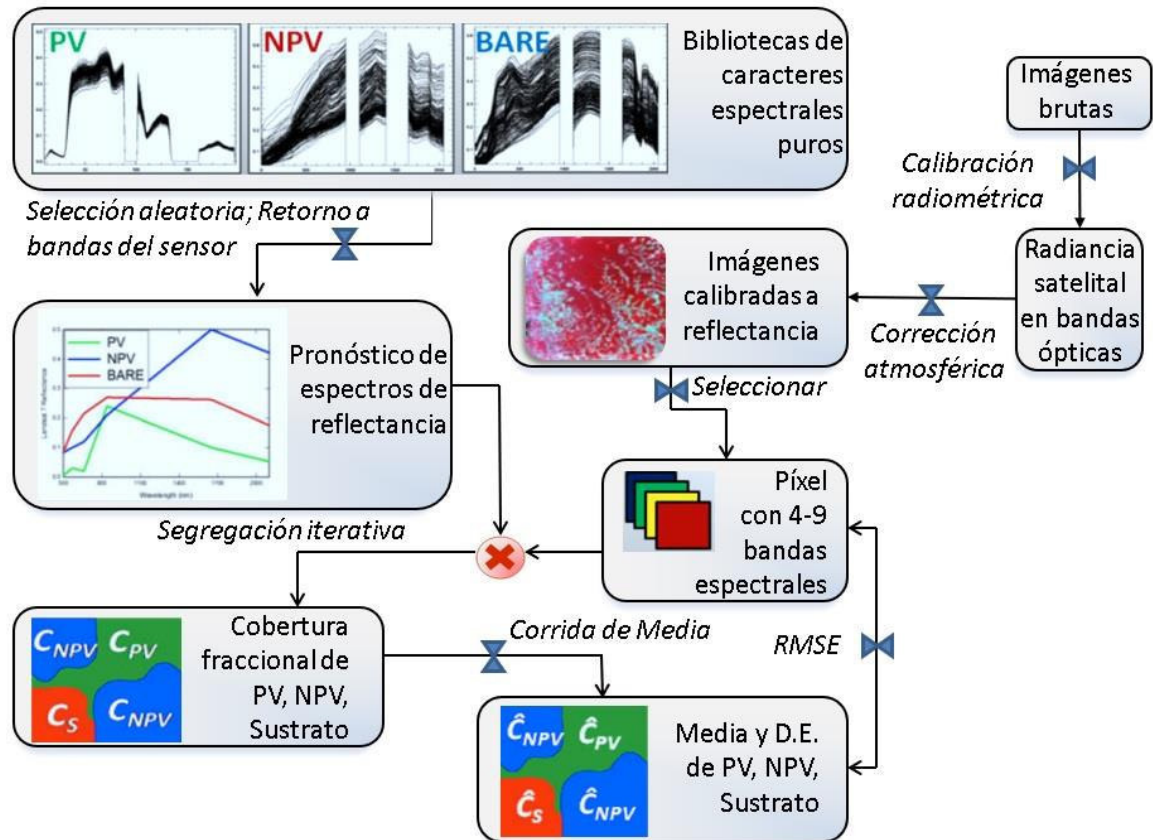
Se empleó la data SRTM para la generación del modelo de pendiente usando la herramienta *topographic modeling* del *software* ENVI. La pendiente indica el grado de inclinación de la superficie con respecto a la horizontal y se mide en grados; así 0° indica una superficie plana y horizontal. El análisis consistió en la generación de isolineas de la imagen SRTM (Figura 10a). Las isolineas que delimitaron la planicie aluvial fueron seleccionadas y corregidas con la información de pendiente (Figura 10b), con valores menores a 1.5 grados. El vector resultante se transformó a un formato raster con valores de píxeles de; planicie aluvial igual a 1 y tierra firme de 2 (Figura 10c).



**Figura 10.** (a) Imagen SRTM; tonos más oscuros indican menor elevación. (b) Pendiente; tonos más azules indican menor inclinación de la superficie respecto a la horizontal. (c) Resultado del análisis de contorno de la imagen SRTM corregida con la pendiente del área de estudio. Línea roja, indica el resultado de digitalización de las isolineas de contorno de la planicie aluvial.

#### 4.3.2 Análisis de datos OLI:

Todo el procesamiento digital fue realizado con el *software* CLASlite® desarrollado por el instituto Carnegie para la ciencia del departamento de ecología global (Figura 11) (Asner *et al.*, 2009).

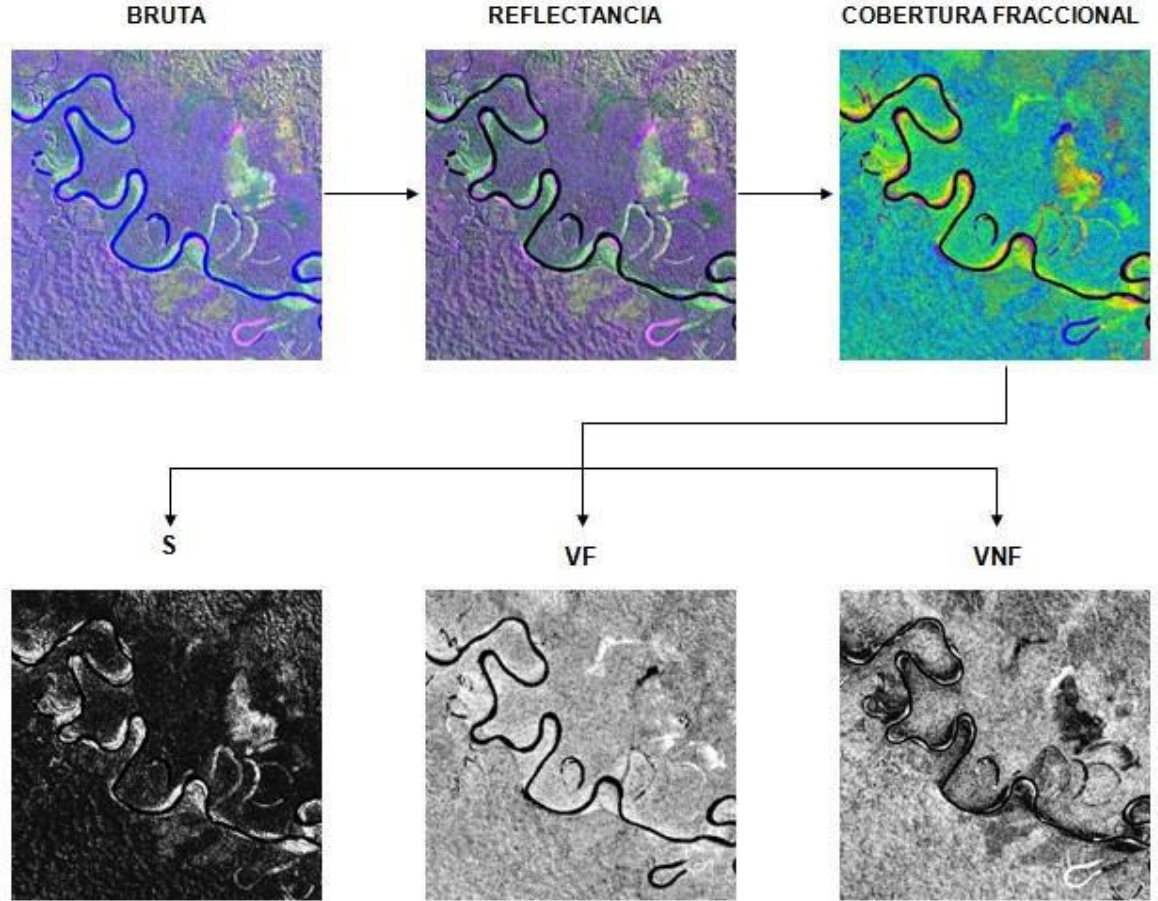


**Figura 11.** Pasos del procesamiento automático de las imágenes OLI Landsat-8 con CLASlite para la obtención de imágenes de cobertura fraccional.

Los pasos consisten en: una calibración radiométrica convirtiendo los valores digitales de cada píxel de la imagen en unidades de radiancia usando los valores de conversión obtenidos de los metadatos de las imágenes. Una vez obtenidos los valores radiométricos, el *software* implementa la corrección atmosférica, *second simulation of the satellite signal in the solar spectrum 6SV* (Vermote, 1997), un proceso totalmente automático que convierte los valores de radiancia a valores de reflectancia, para cada banda espectral. Esta corrección minimiza los efectos del vapor de agua, aerosoles y



polvo atmosférico en las imágenes, modelando las condiciones atmosféricas en cada imagen. Luego, CLASlite realiza el análisis de cobertura fraccional a través del algoritmo de mezcla conocido como *Automated Monte Carlo Unmixing* (AutoMCU) (Asner & Heidebrecht, 2002; Asner *et al.*, 2004), la cual proporciona un análisis cuantitativo de la cobertura fraccional o porcentual (0-100%) de la vegetación viva o muerta y sustrato desnudo de cada pixel de la imagen. Técnicamente la vegetación viva es llamada Vegetación Fotosintética (VF) porque mantiene propiedades espectrales únicas asociadas con pigmentos fotosintéticos foliares y contenidos hídricos de dosel. La fracción de vegetación muerta o senescente es denominada Vegetación No Fotosintética (VNF) la cual es mostrada en el espectro como un material superficial brillante con características espectrales asociadas con componentes de carbono vegetal. El Sustrato desnudo o superficie descubierta (S) es dominado por suelo mineral expuesto, pero está comprendida secundariamente de varios tipos de rocas (Figura 12).



**Figura 12.** Procesamiento de las imágenes OLI Landsat-8 con CLASlite. Las bandas 1,2 y 3 de la imagen de cobertura fraccional corresponden a la superficie descubierta o suelo (S), vegetación fotosintética (VF) y vegetación no fotosintética (VNF) respectivamente, con valores entre 0 a 100.

El sub-modelo AutoMCU está basado en un algoritmo probabilístico originalmente desarrollado para ecosistemas de sabanas, boscosos y arbustivos, la cual más tarde fue modificado para bosques tropicales. El método usa tres librerías espectrales, endmember, derivados de extensas mediciones de campo e imágenes satelitales hiperespectrales, para descomponer cada pixel usando la siguiente ecuación lineal;

$$\rho(\lambda)_{\text{pixel}} = \sum [C_e \cdot \rho(\lambda)_e] + \epsilon = [C_{vf} \cdot \rho(\lambda)_{vf} + C_{vnf} \cdot \rho(\lambda)_{vnf} + C_{\text{substrato}} \cdot \rho(\lambda)_{\text{substrato}}] + \epsilon \quad (1)$$

Donde  $\rho(\lambda)_e$  es la reflectancia de cada cobertura terrestre endmember (e) en longitud de onda  $\lambda$  y  $\epsilon$  es el error. Los endmember de cobertura terrestre son VF, VNF y S. La solución de cada fracción de cobertura de cada sub-pixel ( $C_e$ ) requiere que las observaciones satelitales  $\rho(\lambda)_{\text{pixel}}$  contengan suficiente información espectral para

resolver una serie de ecuaciones lineares, cada uno de la forma de la ecuación indicada, pero en diferentes longitudes de onda ( $\lambda$ ). Una restricción adicional sobre la solución de la ecuación (1) es que las fracciones de cobertura dentro de cada pixel sumen la unidad.

Tradicionalmente hubo un limitado número de firmas espectrales de VF, VNF y Sustrato desnudo para regiones tropicales, sin embargo, el modelo AutoMCU requiere de librerías de reflectancia espectral [ $\rho_{vf}(\lambda)$ ,  $\rho_{vnf}(\lambda)$  y  $\rho_{sustrato}(\lambda)$ ] que abarquen la variación común en estas firmas espectrales. La librería espectral del sustrato desnudo fue colectada de un diverso rango de tipos de suelos, niveles de superficie de materia orgánica y condiciones húmedas, usando espectro-radiómetros de campo y midiendo la reflectancia superficial de 400 – 2500 nm. Esta librería contiene espectros de minerales expuestos tales como oxisoles y ultisoles, y rocas incluyendo granitos y basaltos. Las colecciones espectrales para la VNF incluyeron superficies de hojarasca, pastizales senescentes, y residuos de tala de árboles de un amplio rango de especies y estados en descomposición. Estas dos librerías espectrales endmember abarcan la variación común en materiales superficiales encontradas ampliamente en los bosques tropicales de la Amazonía, Centro América, y Hawaii, con variabilidad estadística bien definida.

En contraste a los espectros de VNF y sustrato desnudo que pueden ser colectados usando espectrómetros de campo, el espectro de VF de especies forestales requiere que los datos sean colectados desde la parte alta del dosel. Esto es muy difícil de lograr en doseles forestales que alcanzan alturas de 50 metros o más. Las mediciones espectrales de hojas individuales, follaje, o doseles parciales (p.ej. ramas) introducen mayores errores en modelos espectrales mixtos y no pueden ser usados. Por lo tanto, el espectro del dosel fue compilado de mediciones hechas usando el *Earth Observing-1 Hyperion sensor*, el primer sensor hiperespectral a bordo de un vehículo espacial para aplicaciones ambientales. La librería espectral de la VF fue compilada de áreas

de estudio de las regiones amazónicas de Perú y Brasil, Costa Rica y las islas Hawaianas.

La librería de VF incluye colecciones espectrales del sensor Hyperion de bosques intactos de tierra firme, bosques ribereños y bosques inundables, bosques de planicie y de montaña, bosques dominados por bambú y palmeras, bosques secundarios regenerados de estadios tempranos a tardíos y bosques con tala selectiva en el pasado. Los espectros mantenidos dentro de las librerías endmember para el submodelo AutoMCU representan más de 400,000 observaciones de espectrómetros de campo y satelitales colectadas ampliamente desde Centro y Sudamérica, así como de los bosques tropicales de las islas del Pacífico.

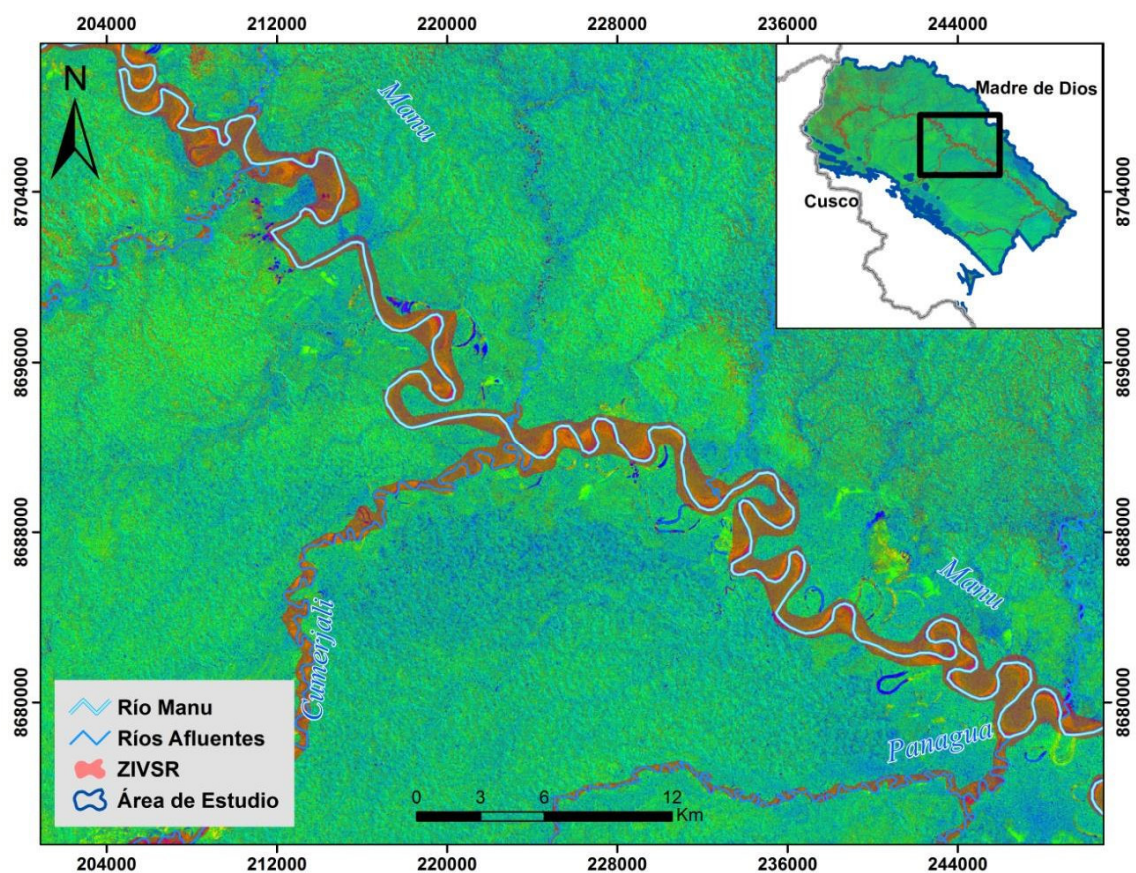
El AutoMCU selecciona de forma iterativa un espectro de VF, VNF y Sustrato desnudo de cada librería y mezcla la reflectancia de cada pixel en fracciones de cobertura constituyente usando la ecuación mencionada. El proceso de selección aleatoria es repetido hasta que la solución alcance un valor medio para cada fracción de cobertura superficial.

Finalmente, se realizó un mosaico de las imágenes de cobertura fraccional con el *software* ENVI y este se recortó basándose en el área de estudio. Por último, la imagen fue corregida geométricamente para la zona asignada.

#### *4.3.3 Extracción de cuerpos de agua y digitalización de la Zona de Influencia de la Vegetación Riparia (ZIVSR):*

Los cuerpos de agua tales como ríos y lagos fueron enmascarados automáticamente por CLASlite. Este proceso es logrado por la detección de propiedades de reflectancia únicas del agua, la cual es caracterizado generalmente por un decaimiento de la reflectancia de la banda azul (~400 nm) al infrarojo cercano (> 800 nm) (Asner *et al.*, 2009). En la imagen de cobertura fraccional se obtuvieron valores negativos (-1) para las bandas de VF, VNF y S.

La digitalización de la zona de influencia de la vegetación riparia (ZIVSR) se realizó manualmente y en base a la imagen de cobertura fraccional (Figura 13). Los ríos analizados fueron: Manu, Pinquen, Panagua, Cumerjali, Fierro, Sotileja, Sarayacu y Sapoapa. Estos fueron seleccionados principalmente por ser los mayores afluentes del río Manu, por su visualización en las imágenes Landsat y por la fácil identificación de patrones de vegetación riparia. El vector digitalizado fue transformado a formato raster con valores de pixeles igual a 1.



**Figura 13.** Digitalización manual de la Zona de Influencia de la Vegetación Riparia elaborado en base a la imagen de cobertura fraccional.

#### 4.4 CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE VEGETACIÓN DE LOS BHAS-PNM

La identificación de los tipos de vegetación se basó en el Documento Técnico N°12 “Diversidad de Vegetación de la Amazonía Peruana expresada en un Mosaico de Imágenes de Satélite” del proyecto BIODAMAZ (BIODAMAZ, 2004a).

Este documento distingue los tipos de vegetación de la llanura amazónica o bosques húmedos de la Amazonia suroccidental, cuyas características se presentan como una fisiografía de tendencia plana y la fisionomía de árboles grandes, también la exposición a flujos de gradientes de inundación estacional de los ríos, en las partes más bajas, generalizada en “vegetación de áreas inundables”, en contraste con los relieves más altos, con “vegetación de altura”.

Para la siguiente clasificación, solo se tomaron los tipos de vegetación que están presentes en los BHAS-PNM y cuyas características espaciales sean mínimas al área que pueda ser diagnosticado por imágenes Landsat, es decir, que abarquen áreas mayores que la resolución espacial (30x30 metros).

**Tabla 2.** Tipos de Vegetación identificados en los bosques húmedos de la Amazonia suroccidental del Parque Nacional del Manu en un mosaico de imágenes OLI del Landsat-8.

<b>BOSQUES HÚMEDOS DE LA AMAZONÍA SUROCCIDENTAL O LLANURA AMAZÓNICA</b>	
<b>1. VEGETACIÓN DE PLANICIE ALUVIAL. EXPUESTA A LA INUNDACIÓN ESTACIONAL DEL FLUJO DE LAS CRECIENTES DE LOS RÍOS; EN TIERRAS BAJAS DE ORIGEN CRECIENTE O SUB-CRECIENTE.</b>	
<b>TIPO DE VEGETACIÓN</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>BOSQUE SUCESIONAL ARBUSTIVO - ARBÓREO</b>	Localizado dentro del paisaje aluvial, en las terrazas de la llanura fluvial reciente y subreciente, adyacentes y laterales y expuestos a ciclos de inundación estacional de las crecientes de los ríos. Se caracteriza por las comunidades herbáceas, pioneras y colonizadoras, del paisaje aluvial u orillas de sedimentación activa, seguido de un núcleo arbustivo-arbóreo en la parte central o lateral de los orillares, pero con comunidades herbáceas o leñosas de hábitos sucesionales.

<p><b>PANTANOS HERBÁCEOS CON DOMINANCIA DE GRAMÍNEAS</b></p>	<p>Comprenden las comunidades herbáceas hidromórficas y dispersas con fisionomía homogénea, en extensiones pequeñas, con especies perennes acuáticas y subacuáticas, que se desarrollan en las lagunas o “cochas” de las terrazas depresionadas, recientes y subrecientes, generalmente localizadas en los sectores interfluviales, expuestos a las inundaciones estacionales de los ríos y la acumulación de las aguas de lluvia</p>
<p><b>PANTANOS EN SUCESIÓN HERBÁCEO – ARBUSTIVOS</b></p>	<p>Estas comunidades se presentan en masas herbáceas y arbustivas dispersas, asociadas con palmeras, ubicadas al interior de la planicie de inundación estacional de los ríos, correspondiente a las terrazas aluviales recientes y subrecientes. Las especies están adaptadas al hidromorfismo del suelo y a las influencias estacionales de las aguas de los ríos, hasta donde llegan, de forma tamizada por la vegetación de los “complejos de orillares”, o por filtración del sistema de vasos comunicantes. En algunas localidades, corresponden a la continuación de los “pantanos herbáceos con dominancia de gramíneas”, que lo circunda parcialmente; o comprende a pantanos arbustivos, a menudo rodeados de cubierta sucesional herbáceo-arbustivo.</p>
<p><b>AGUAJALES DENSOS Y MIXTOS, O COMUNIDADES DE MAURITIA FLEXUOSA ASOCIADOS CON OTRAS ESPECIES</b></p>	<p>La denominación de “aguajales deriva del fitónimo dado a un área poblada exclusivamente por palmeras “aguajes” (<i>Mauritia flexuosa</i> L.f.), de modo que comprenden los palmales densos o “aguajales de bajal”, conformados por comunidades casi puras de palmeras “aguajes” gigantes y monocaulas, asociadas con <i>Euterpe precatoria</i> “huasaí”, <i>Virola</i> sp., <i>Symphonia globulifera</i>, <i>Hura crepitans</i>, y otras. Todas las especies están adaptadas a los terrenos pantanosos y suelos hidromórficos de las terrazas bajas planas a ligeramente onduladas, de origen reciente a subreciente, localizados en las partes interiores o alejados de las orillas de los ríos. No están expuestos directamente a la inundación estacional debido a las crecientes de los ríos. La acumulación de agua ocurre por escorrentía de las lluvias de los terrenos adyacentes, y por las crecientes de los ríos, así como por efecto de filtración del sistema de vasos comunicantes y de aguas tamizadas por el follaje de la vegetación.</p>
<p><b>BOSQUES MADUROS DE TERRAZAS ESTACIONALMENTE INUNDABLES</b></p>	<p>Corresponde a la vegetación de plantas vasculares dominados por árboles. La estructura del bosque incluye altos y densos doseles con árboles emergentes. Estos bosques no se inundan completamente, salvo en eventos muy fuertes. Estas áreas presentan suelos ricos que se ve reflejado en la diversidad y abundancia de la flora y fauna (Foster, 1990b).</p>
<p><b>2. VEGETACIÓN DE TERRENOS DE ALTURA O DE “TIERRA FIRME”. NO INUNDABLE POR LAS CRECIENTES DE LOS RÍOS; CON EXCEPCIÓN DE AQUÉLLA EN TERRENOS DE MAL DRENAJE POR LA ACUMULACIÓN DE AGUAS DE LLUVIAS; EN TERRAZAS ONDULADAS, TERRAZAS ALTAS O COLINAS.</b></p>	
<p><b>VEGETACIÓN DE GRAMÍNEAS DE COLINAS DE LA LLANURA AMAZÓNICA</b></p>	<p>Solo observado por los colores de reflectancia de las imágenes satelitales. El patrón de colores es muy similar al de los pantanos herbáceos con dominancia de gramíneas, por lo que muy probablemente este tipo de vegetación este dominado por gramíneas en las regiones de tierra firme, relacionado a los bosques de pacaes (<i>Guadua</i> sp.).</p>

**BOSQUES DE  
COLINAS DE LA  
LLANURA  
AMAZÓNICA**

Comprende las comunidades boscosas de “tierra firme” que abarcan la mayor extensión de la cubierta vegetal de la llanura amazónica. Estas comunidades prosperan sobre las terrazas altas y onduladas y colinas bajas del Terciario y Cuaternario, con diferentes grados de disecciones y cimas. A escala de mayor detalle, se diferencian comunidades o formaciones vegetales relacionadas con el origen del suelo y el relieve en el conjunto de los bosques de terrazas onduladas, lomadas y colinas. Sin embargo, las características comunes corresponden a los bosques no sujetos ni expuestos a las inundaciones estacionales de los ríos, debido a su ubicación en terrenos más altos del nivel de inundación y correspondientes a las intercuencas, mayormente alejados de los cauces fluviales.

*4.4.1 Árbol de Decisión:*

Un árbol de decisión es un tipo de clasificador multiestado que puede ser aplicado a una simple imagen o a un grupo de imágenes. El proceso consiste en una serie de decisiones binarias que son usadas para determinar la correcta categoría de cada pixel. La segmentación de la imagen en clases no es realizada por decisiones únicas. En cambio, cada decisión divide la data en uno o dos posibles clases o grupos de clases (ENVI 4.7).

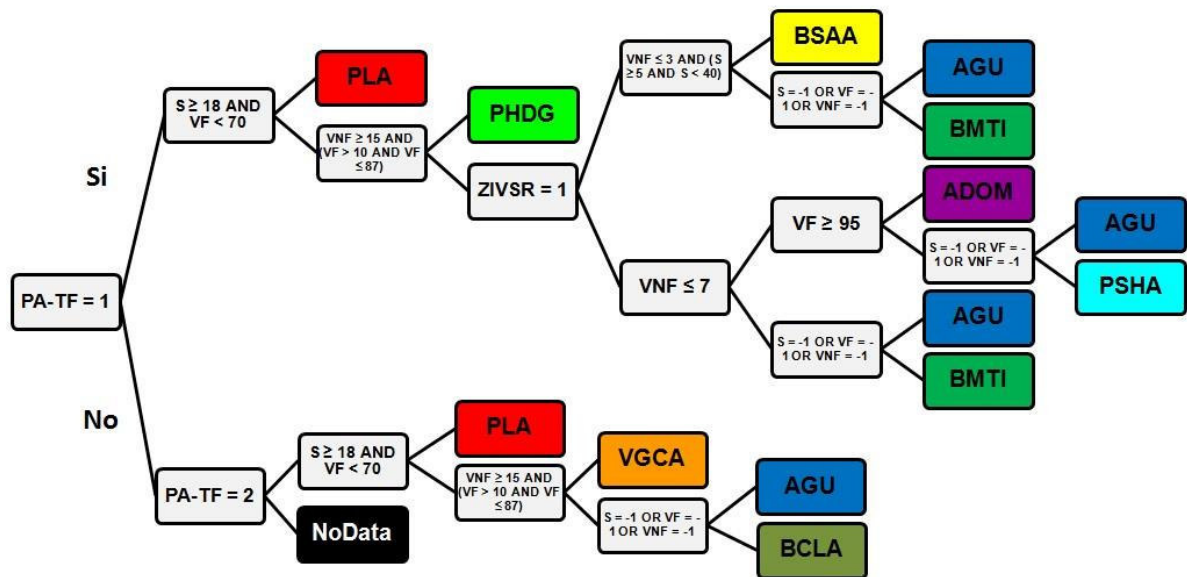
El grupo de imágenes empleados fueron: Vegetación Fotosintética (VF), Vegetación No Fotosintética o Senescente (VNF), Superficies descubiertas (S), Planicie Aluvial y Tierra Firme (PA-TF) y Zona de Influencia de Vegetación en Sucesión Riparia (ZIVSR).

Las reglas de decisión para el árbol de decisión que fueron implementadas en este trabajo son descritas de la siguiente manera:

- Clase 1: (PLA = Playas): PA-TF = 1, ( $S \geq 18$  y  $VF < 70$ ) también PA-TF = 2, ( $S \geq 18$  y  $VF < 70$ ).
- Clase 2: (PHDG = Pantanos Herbáceos con Dominancia de Gramíneas): PA-TF = 1, ( $S < 18$  y  $VF \geq 70$ ), ( $VNF \geq 15$  y  $VF > 10$  y  $VF \leq 87$ ).



- Clase 3: (BSAA = Bosque Sucesional Arbustivo-Arbóreo): PA-TF = 1, ( $S < 18$  y  $VF \geq 70$ ), ( $VNF < 15$  y  $VF \leq 10$  y  $VF > 87$ ), ZIVSR = 1, ( $VNF \leq 3$  y  $S \geq 5$  y  $S < 40$ ).
- Clase 4: (PSHA = Pantanos en Sucesión Herbáceo-Arbustiva): PA-TF = 1, ( $S < 18$  y  $VF \geq 70$ ), ( $VNF < 15$  y  $VF \leq 10$  y  $VF > 87$ ), ZIVSR  $\neq$  1,  $VNF \leq 7$ ,  $VF < 95$ .
- Clase 5: (ADOM = Aguajales densos y mixtos, o comunidades de *Mauritia flexuosa* asociados con otras especies): PA-TF = 1, ( $S < 18$  y  $VF \geq 70$ ), ( $VNF < 15$  y  $VF \leq 10$  y  $VF > 87$ ), ZIVSR  $\neq$  1,  $VNF \leq 7$ ,  $VF \geq 95$ .
- Clase 6: (BMTI = Bosques Maduros de terrazas estacionalmente inundables): PA-TF = 1, ( $S < 18$  y  $VF \geq 70$ ), ( $VNF < 15$  y  $VF \leq 10$  y  $VF > 87$ ), ZIVSR = 1, ( $VNF > 3$  y  $S < 5$  y  $S \geq 40$ ) también PA-TF = 1, ( $S < 18$  y  $VF \geq 70$ ), ( $VNF < 15$  y  $VF \leq 10$  y  $VF > 87$ ), ZIVSR  $\neq$  1,  $VNF > 7$ .
- Clase 7: (VGCA = Vegetación de gramíneas de colinas de la llanura amazónica): PA-TF = 2, ( $S < 18$  y  $VF \geq 70$ ), ( $VNF \geq 15$  y  $VF > 10$  y  $VF \leq 87$ ).
- Clase 8: (BCLA = Bosques de colinas de la llanura amazónica): PA-TF = 2, ( $S < 18$  y  $VF \geq 70$ ), ( $VNF < 15$  y  $VF \leq 10$  y  $VF > 87$ ).
- Clase 9: (AGU = Ríos y Lagos):  $S = -1$  ó  $VF = -1$  ó  $VNF = -1$
- Clase 10: (NoData): PA-TF  $\neq$  1 y PA-TF  $\neq$  2.



**Figura 14.** Árbol de decisiones usado para clasificar los tipos de vegetación de los bosques húmedos de la Amazonia suroccidental del Parque Nacional del Manu.

#### 4.5 PROCESAMIENTO POST-CLASIFICATORIO

En la imagen clasificada, existen algunos píxeles aislados o pequeñas regiones de píxeles incorrectamente clasificados. Este da un aspecto granuloso o manchado a la imagen clasificada. El procesamiento post-clasificadorio involucra la remoción de ruido y mejora de la calidad de la imagen clasificada a través de la limpieza de datos erróneos o para generalizar datos y así deshacerse de detalles innecesarios y obtener un análisis más general (ESRI, 2014).

El procesamiento post-clasificadorio consistió de dos análisis espaciales (Figura 15):

##### 4.5.1 Filtro de la imagen clasificada:

En este paso se removieron los píxeles aislados o ruidos de la imagen clasificada. Para esto se aplicó un filtro mayoritario.

El filtro mayoritario reemplaza las celdas de una imagen basándose en el valor mayoritario de sus celdas vecinas contiguas. El filtro mayoritario debe satisfacer dos criterios antes que ocurra un reemplazo. Primero, el número de celdas vecinas con el

mismo valor debe ser suficientemente grande para ser el valor mayoritario. Es decir, tres de cuatro o cinco de ocho celdas conectadas deben tener el mismo valor con el parámetro mayoritario. Segundo, aquellas celdas deben ser contiguas al centro del filtro específico (Por ejemplo, tres de cuatro celdas deben ser iguales). El segundo criterio respecto a la conectividad espacial de las celdas, minimiza la corrupción de patrones espaciales celulares. Si estos criterios no son aplicados, no ocurrirá el reemplazo y la celda conservará su mismo valor.

#### *4.5.2 Suavizado de límites de clase y agrupamiento de imagen clasificada:*

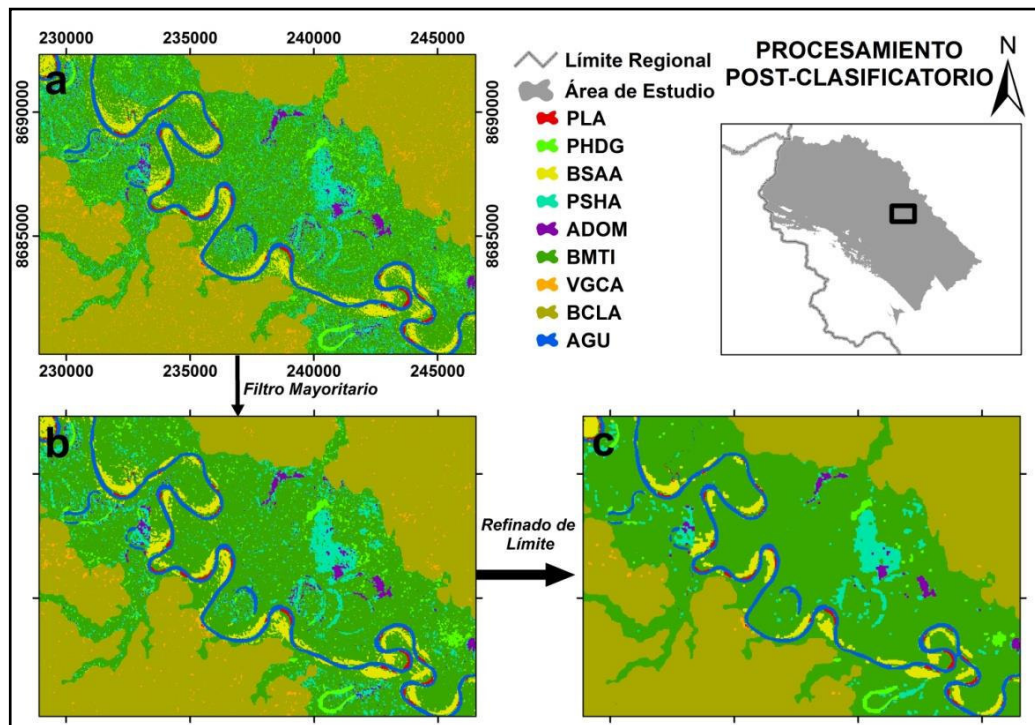
Este paso suaviza los límites de clase desigual y amontona las clases. Para ello se aplicó un refinado de límite.

Esta herramienta se utiliza principalmente para refinar bordes irregulares entre clases. Este método expande y encoge *clusters* para refinar límites en una escala relativamente grande. En un principio, las zonas de mayor prioridad invaden las zonas vecinas o de menor prioridad por una celda en todas las ocho direcciones. Después, se encogen hacia aquellas celdas que no están completamente rodeadas por las celdas del mismo valor. Todas las celdas que no son internas (es decir, aquellas que no se pueden visualizar como centro de las ocho vecindades más cercanas del mismo valor) se pueden reemplazar.

También es posible reemplazar las islas finas dentro de una zona, que pueden verse como que comparten límites con la zona. La región de menor tamaño que se puede mantener es un bloque de celdas de 3x3. Por lo tanto, las regiones finas se pueden reemplazar. Por ejemplo, se elimina una región de 2 celdas de ancho y 10 celdas de largo, debido a que no puede recuperarse después de encogerse.

Los parámetros de refinado especificados consistieron de un ordenamiento del tipo descendente (Las zonas con las áreas totales más grandes tienen una prioridad más alta de expandirse a zonas con áreas totales más pequeñas) y con un suavizado en

dos direcciones (realiza la expansión y contracción según el tipo de ordenamiento y después realiza una expansión y contracción adicional con la prioridad invertida).



**Figura 15.** Pasos del procesamiento post-clasificatorio. (a) Imagen clasificada bruta. (b) Imagen clasificada con filtro mayoritario. (c) Imagen clasificada con filtro mayoritario y refinado de límite.

#### 4.6 PRECISIÓN DE LA CLASIFICACIÓN

La validación de la clasificación se efectuó comparando dos fuentes de información: i) el mapa derivado de la clasificación digital, y ii) la información de referencia que comprende la interpretación de las imágenes satelitales de alta resolución espacial y los puntos de control de campo.

##### 4.6.1 Puntos de control de campo e imágenes satelitales de alta resolución espacial:

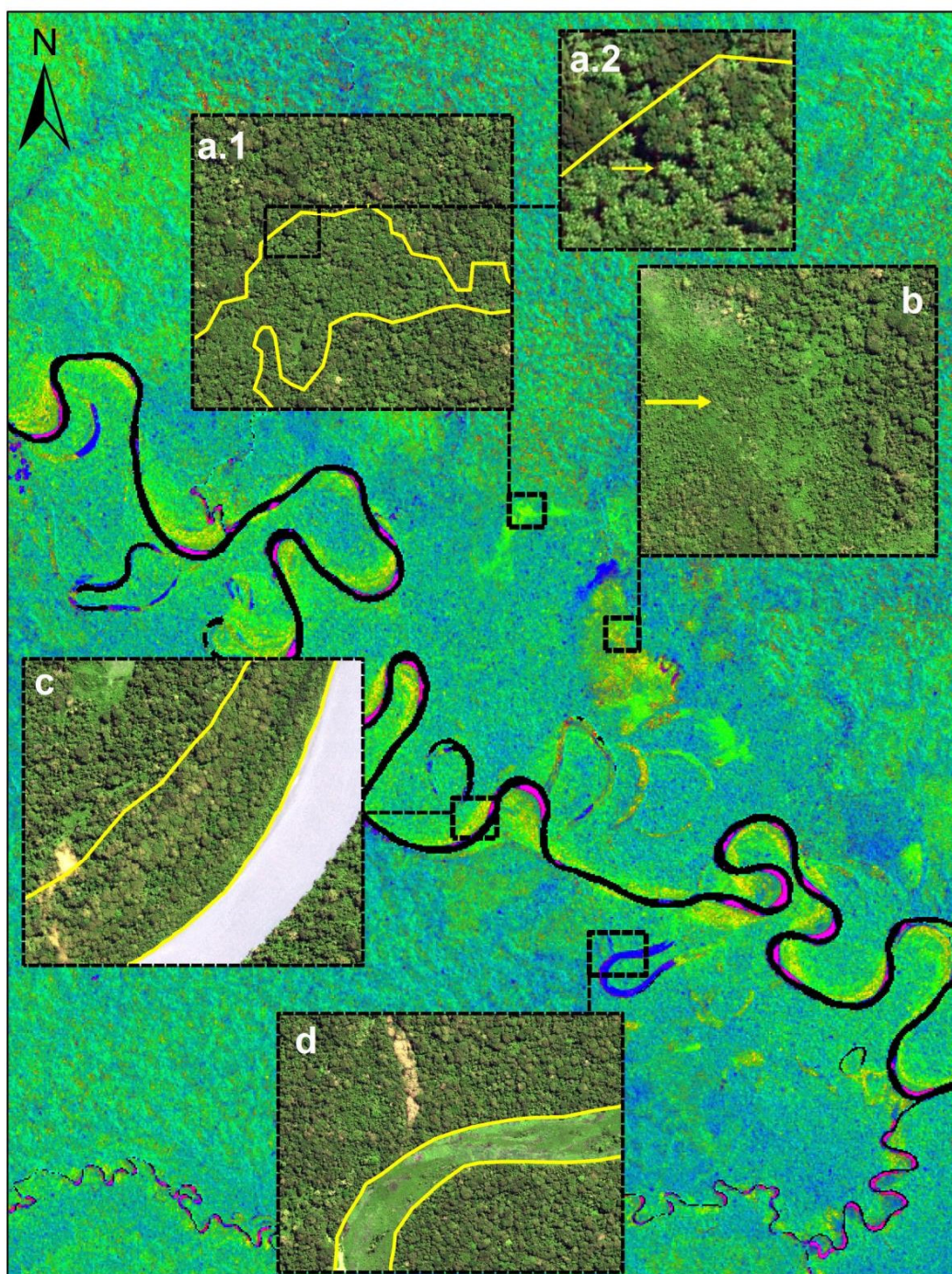
Los puntos de control de campo seleccionados corresponden a los puntos del proyecto de cámaras trampas de TEAM-network, las cuales se distribuyen regularmente dentro del área administrativa de la estación biológica de Cocha Cashu y el puesto de control y vigilancia de Pakitza del SERNANP (Figura 8). En total se registraron 60 puntos

dentro de un área de 20 025 ha (1.8% del área de estudio), siendo la distancia mínima de separación entre punto y punto de 1.5 km. Estos puntos fueron evaluados entre junio y agosto del 2014 mediante un GPS. Para la toma de datos se registraron las características de la vegetación como; el tipo de vegetación dominante (árboles, palmeras, arbustos y hierbas) y la dominancia de algunas especies indicadoras de hábitats. Asimismo, las características del medio circundante fueron descritas (área inundada/no inundada, complejo de orillares, terraza, entre otras) (Anexo III). La información fue comparada con datos de caracterización vegetal del proyecto TEAM-network (datos no publicados) y asignados al tipo de vegetación correspondiente.

Además, se emplearon imágenes satelitales de alta resolución espacial (Figura 9b) para complementar el tamaño de muestreo. Para este caso se ubicaron, sobre el área de estudio, puntos de muestreo denominados píxeles de referencia (Jensen, 1996).

Los píxeles de referencia fueron generados tomando en cuenta la cantidad de categorías obtenidas. Para este fin Congalton (1991) aconseja un umbral de 50 píxeles por cada clase temática. Es así que en total se generaron 522 píxeles de referencia basados en las características estructurales de la vegetación observadas en las imágenes de alta resolución (Figura 16).





**Figura 16.** Identificación de los tipos de vegetación basados en imágenes satelitales de alta resolución. a.1) Aguajales densos o comunidades de *Mauritia flexuosa*, a.2) Identificación de poblaciones de *Mauritia flexuosa* a través del patrón estrellado de hojas del dosel, b) Pantanos en Sucesión Herbáceo – Arbustiva, c) Bosque Sucesional Arbustiva – Arbórea o vegetación de complejo de orillares, d) Pantanos Herbáceos con Dominancia de Gramíneas. Línea amarilla delimita el tipo de vegetación.

#### 4.6.2 Mediciones de Precisión:

Se generó una matriz de confusión para efectuar la relación de la imagen clasificada y la información de referencia. Esta matriz se conforma de filas y columnas en donde se ubican los valores que expresan el número de píxeles de referencia asignados a una categoría particular, en relación con la verdadera categoría verificada con la información de campo y de imágenes de alta resolución.

El resultado de la matriz de confusión se evaluó utilizando diferentes mediciones de precisión. Estos se detallan a continuación:

Precisión Global (PG). Indica la probabilidad de que un píxel de referencia sea correctamente clasificado. Resulta del cociente del total de píxeles correctamente clasificados con el número total de píxeles de referencia.

$$PG = \frac{\sum_{i=1}^r X_{ii}}{N}$$

$r$  = Número total de filas de la matriz.

$X_{ii}$ : Número de píxeles clasificados correctamente en una categoría.

$N$ : Número total de puntos de muestreo.

Precisión del Productor (PP). Es una medida del error de omisión (Jensen, 1996) que se produce cuando un píxel posee en el terreno una cobertura determinada y no es asignado en el mapa a esa clase. Resulta del cociente del número total de píxeles clasificados correctamente en una categoría entre número total de píxeles de esa categoría. La diferencia se denomina error de omisión.

$$PP\% = \frac{X_{ii}}{X_{+i}} \times 100$$

$PP\%$  = Precisión del product

$X_{ij}$  = Número de píxeles clasificados correctamente en una categoría.

$X_{+i}$ : Total de píxeles de la columna i.

Precisión del Usuario (PU). Muestra la probabilidad de que un píxel clasificado en el mapa verdaderamente presente esa categoría en el terreno (Story & Congalton, 1986). Resulta de la división del número total de píxeles correctos en una categoría entre el número total de píxeles pertenecientes a esa categoría. La diferencia se denomina error de comisión.

$$PU\% = \frac{X_{ii}}{X_{+i}} \times 100$$

$PU\%$  = Precisión del usuario en porcentaje.

$X_{ij}$  = Número de píxeles clasificados correctamente en una categoría.

$X_{+i}$ : Total de píxeles de la fila i.

#### 4.6.3 *Análisis categórico multivariado*

Índice Kappa (K), mide el grado de ajuste debido solo a la exactitud de la clasificación, prescindiendo del causado por factores aleatorios (Hudson & Ramn, 1987). Un valor de K igual a 1 indica un acuerdo pleno entre la realidad y el mapa, mientras un valor cercano a 0 sugiere que el acuerdo observado es puramente al azar.

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r X_{ii} - \sum_{i=1}^r (X_{i+} \times X_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (X_{i+} \times X_{+i})}$$

$r$  = Número total de filas de la matriz.

$X_{ij}$ : Número de píxeles clasificados correctamente en una categoría.

$X_{+i}$ : Total de píxeles de la columna i.



$X_{i+}$ : Total de pixeles de la fila i.

$N$ : Número total de puntos de muestreo.

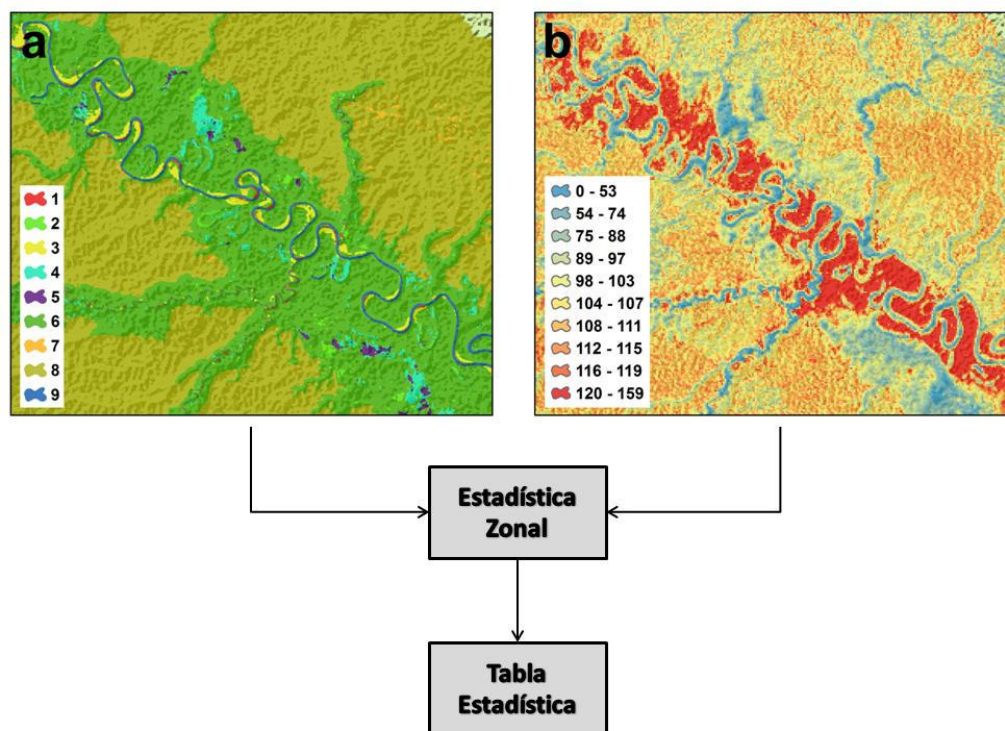
#### **4.7 ESTIMACIÓN DE STOCK DE CARBONO POR TIPO DE VEGETACIÓN**

Se usó la herramienta *zonal statistics as table* (estadística zonal como tabla) del software ArcGIS 10.1 para extraer la información de *stock* de carbono sobre el suelo por tipo de vegetación (ESRI, 2014).

Los datos empleados fueron; el mapa de tipos de vegetación (Figura 17a) para definir las zonas y el mapa de densidad de carbono sobre el suelo del proyecto de “La Geografía del Carbono en Alta Resolución del Perú” (Asner *et al.*, 2014) (Figura 17b) como raster de valores de entrada.

Una zona son todas las celdas en un raster que tienen el mismo valor, sean o no contiguas. La capa de zonas de entrada define la forma y las ubicaciones de las zonas. Mientras que el raster de valores de entrada contiene los valores que se utilizan para calcular la estadística de salida para cada zona.

El resultado fue exportado a un formato de tabla y analizado con Excel.

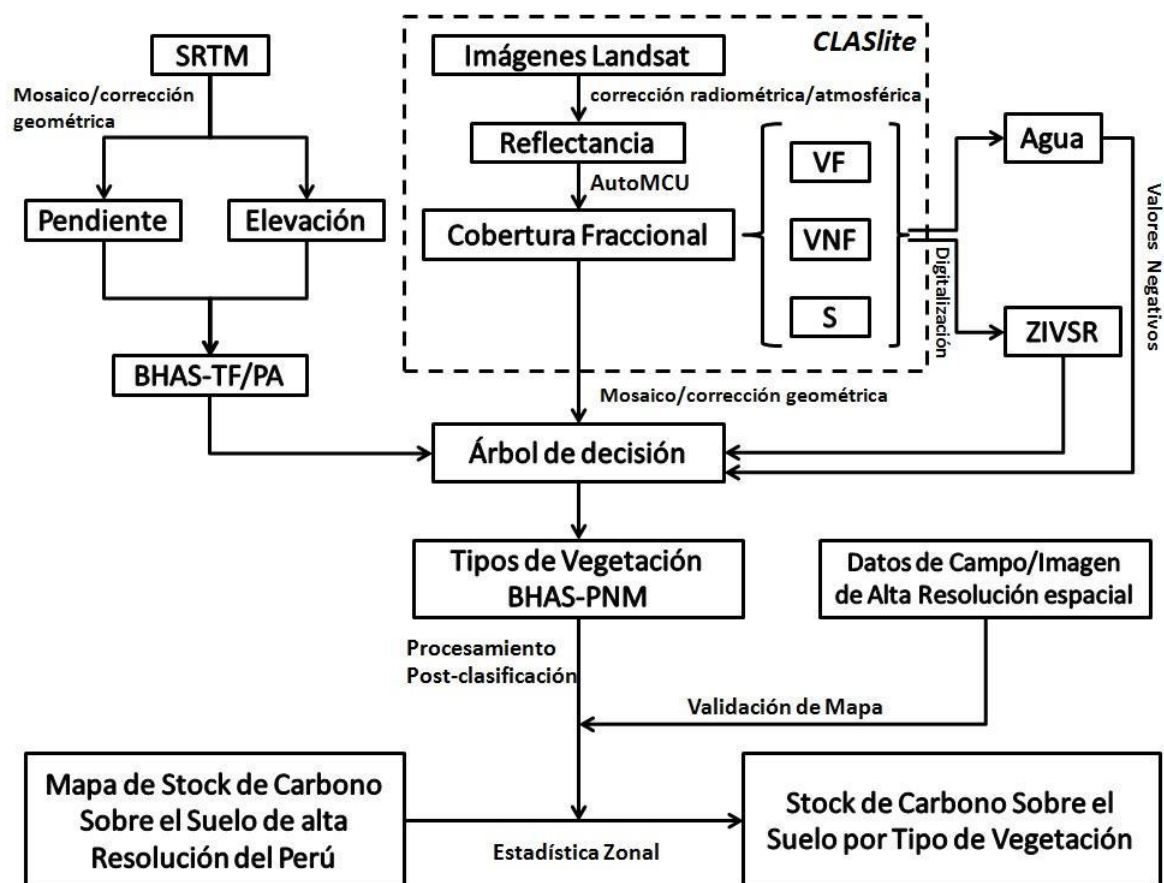


**Figura 17.** Modelo de estimación de *stock* de carbono por tipo de vegetación. **(a)** Imagen clasificada (raster zonal). **(b)** Mapa de *stock* de carbono sobre el suelo (raster de valores de entrada).

## 5 RESULTADOS

### 5.1 SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE VEGETACIÓN DE LOS BHAS-PNM

Se desarrolló un modelo del procesamiento de la información remota para la clasificación y estimación de los *stocks* de carbono sobre el suelo de los tipos de vegetación de los BHAS-PNM (Figura 18). En esta clasificación se emplearon imágenes satelitales Landsat y modelos de elevación digital SRTM. Asimismo, se generó la información de los stocks de carbono sobre el suelo por cada tipo de vegetación clasificada, en base al mapa de stocks de carbono sobre el suelo de alta resolución del Perú.

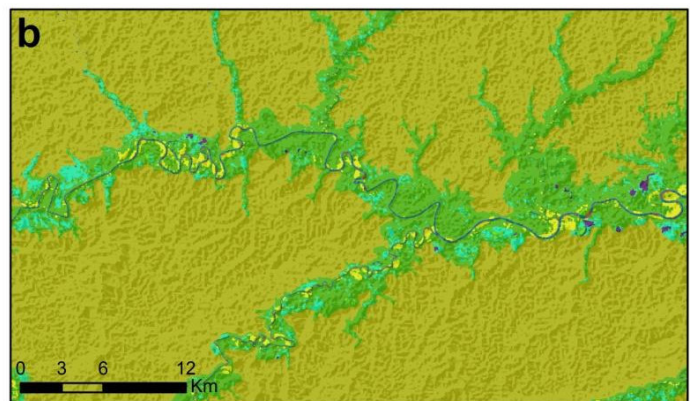
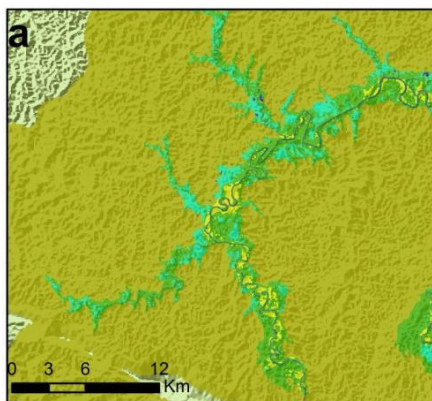
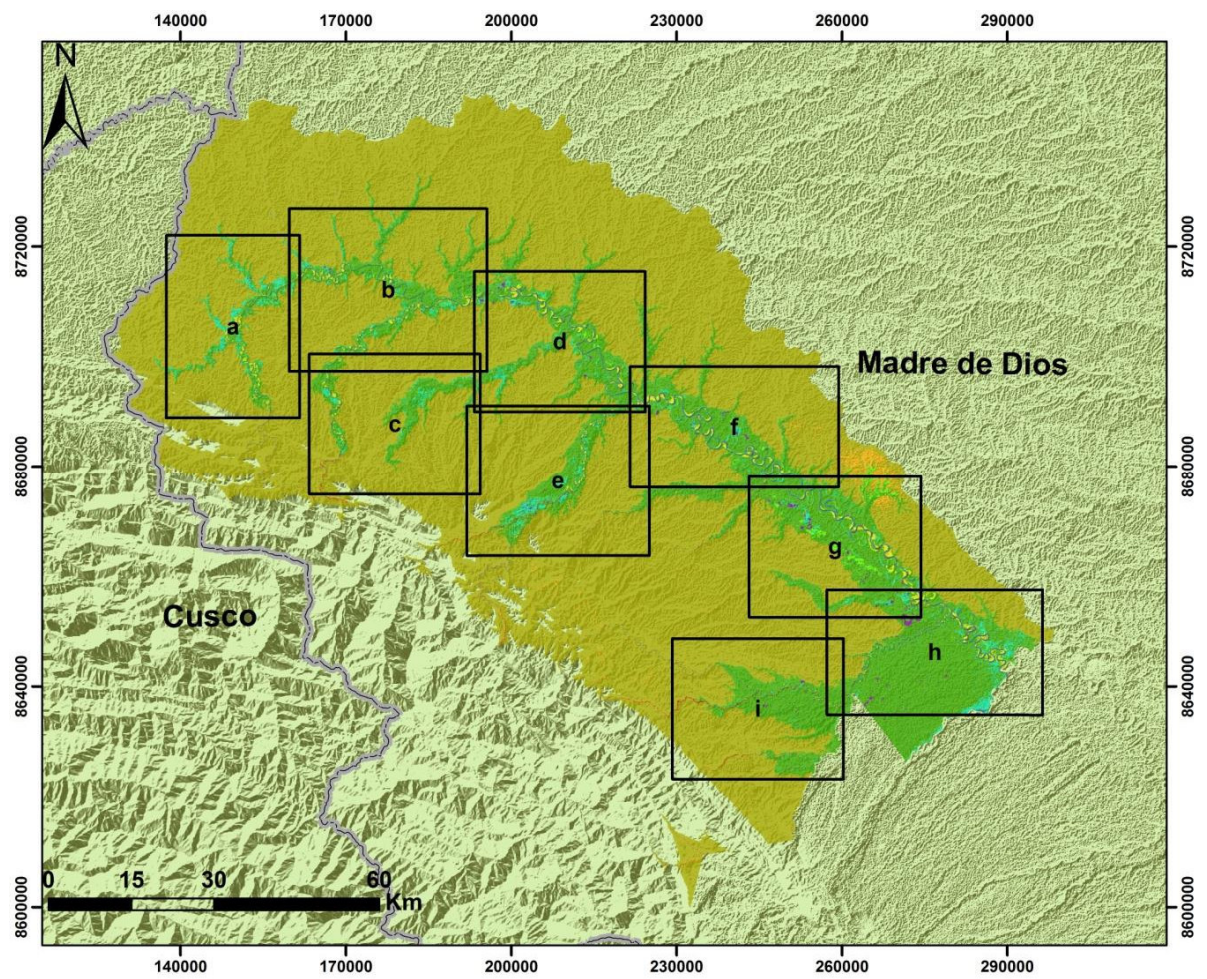


**Figura 18.** Estructura del modelo de procesamiento de la información remota para la clasificación y estimación del *stock* de carbono sobre el suelo de los tipos de vegetación de los bosques húmedos de la Amazonia suroccidental del Parque Nacional del Manu.

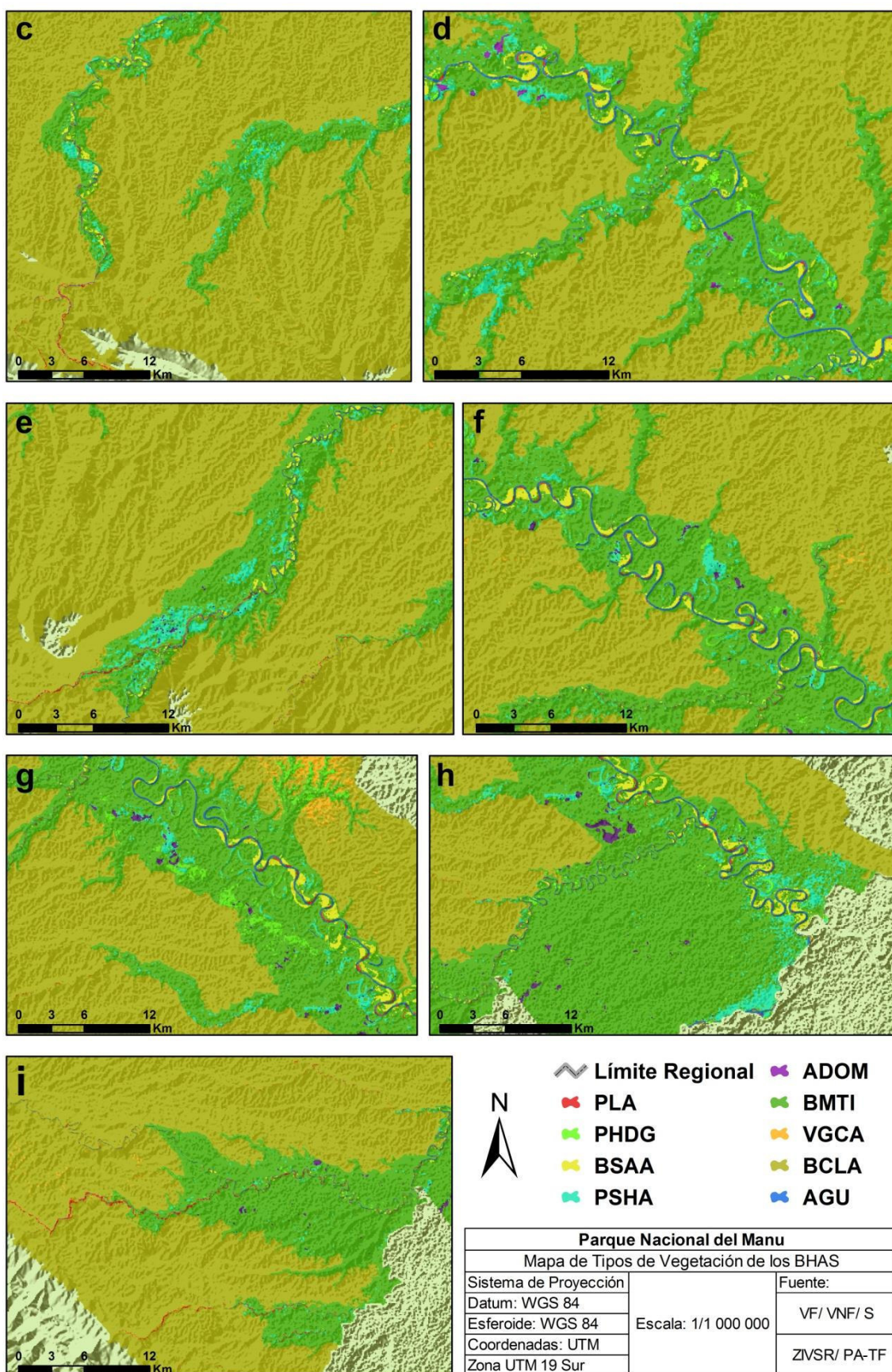
## **5.2 MAPA DE CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE VEGETACIÓN DE LOS BHAS-PNM**

El siguiente mapa muestra los tipos de vegetación de los bosques húmedos de la Amazonia suroccidental del Parque Nacional del Manu. Esta clasificación distingue cinco tipos de vegetación en la planicie aluvial y dos en terrenos de altura o tierra firme.





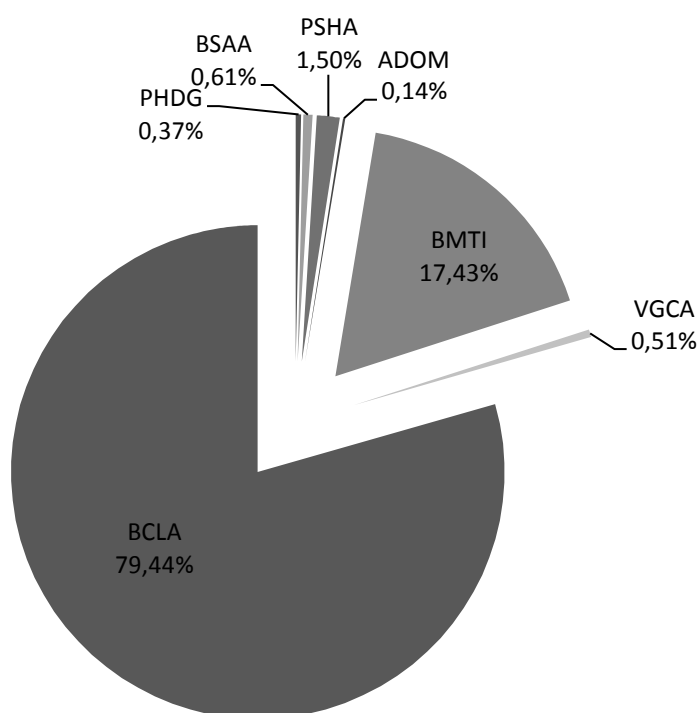




**Figura 19.** Mapa de tipos de vegetación de los bosques húmedos de la Amazonia suroccidental del Parque Nacional del Manu. Las clases identificadas fueron: PLA (playas), PHDG (Pantanos Herbáceos con Dominancia de Gramíneas), BSAA (Bosque Sucesional Arbustivo-Arbóreo, PSHA (Pantanos en Sucesión Herbáceo Arbustiva), ADOM (Aguajales Densos y Mixtos, o comunidades de *Mauritia flexuosa* asociados con otras especies), BMTI (Bosques Maduros de Terrazas Estacionalmente Inundables), VGCA (Vegetación de Gramíneas de Colinas de la Llanura Amazónica), BCLA (Bosques de Colinas de la Llanura Amazónica), AGU (Cuerpos de Agua).

La ecorregión de los BHAS-PNM cubre un total de 1'126 220,02 hectáreas siendo aproximadamente el 66% del área del Parque Nacional del Manu (SERNANP, 2013).

Las más grandes extensiones de vegetación son los bosques de colinas de la llanura amazónica (tierra firme) y bosques maduros de tierras inundables (planicie aluvial). Entre ambos representan cerca al 97% del total de área de los siete tipos de vegetación evaluados (Figura 20).



**Figura 20.** Porcentaje del tamaño de los tipos de vegetación de los bosques húmedos de la Amazonia suroccidental del Parque Nacional del Manu.

### 5.3 VALIDACIÓN DE LA CLASIFICACIÓN

El nivel de exactitud del mapa producido ha sido calculado a través de una matriz de confusión cuyas métricas de exactitud fueron calculadas y luego aplicadas a un índice kappa, que determinó el grado de correlación de la clasificación de las unidades temáticas del mapa con la realidad medida en campo y las imágenes de alta resolución.

De los dos tipos de vegetación que están presentes en los terrenos de altura o tierra firme, solo fue posible tomar datos de campo de los bosques de colinas de la llanura amazónica (BCLA). Por lo que solo se efectuaron las mediciones de precisión mediante imágenes de alta resolución del tipo de vegetación de gramíneas de colinas de la llanura amazónica (VGCA).

Los resultados de la evaluación del mapa de tipos de vegetación de los BHAS-PNM, arrojó una precisión global de 73.37% y un índice kappa de 0.64.

**Tabla 3.** Matriz de confusión y cálculo del Índice Kappa.

Datos Clasificación	Datos de Referencia								P Usuario %	E Comisión %
	PHDG	BSAA	PSHA	ADOM	BMTI	VGCA	BCLA	Total		
PHDG	<b>11</b>	1	3	0	1	0	0	16	68,75	31,25
BSAA	1	<b>31</b>	2	0	3	0	0	37	83,78	16,22
PSHA	11	0	<b>35</b>	6	5	0	0	57	61,40	38,60
ADOM	0	0	3	<b>31</b>	0	0	0	34	91,18	8,82
BMTI	17	19	45	7	<b>95</b>	0	7	190	50,00	50,00
VGCA	0	0	0	0	0	<b>0</b>	0	0	0,00	100,00
BCLA	0	0	0	0	5	19	<b>224</b>	248	90,32	9,68
Total	40	51	88	44	109	19	231	582		
P Productor %	27,50	60,78	39,77	70,45	87,16	0,00	96,97			
E Omisión %	72,50	39,22	60,23	29,55	12,84	100,00	3,03			
Proporción de muestreo	6,87	8,76	15,12	7,56	18,73	3,26	39,69			
Precisión Global %	73,37									
Kappa	0,64									



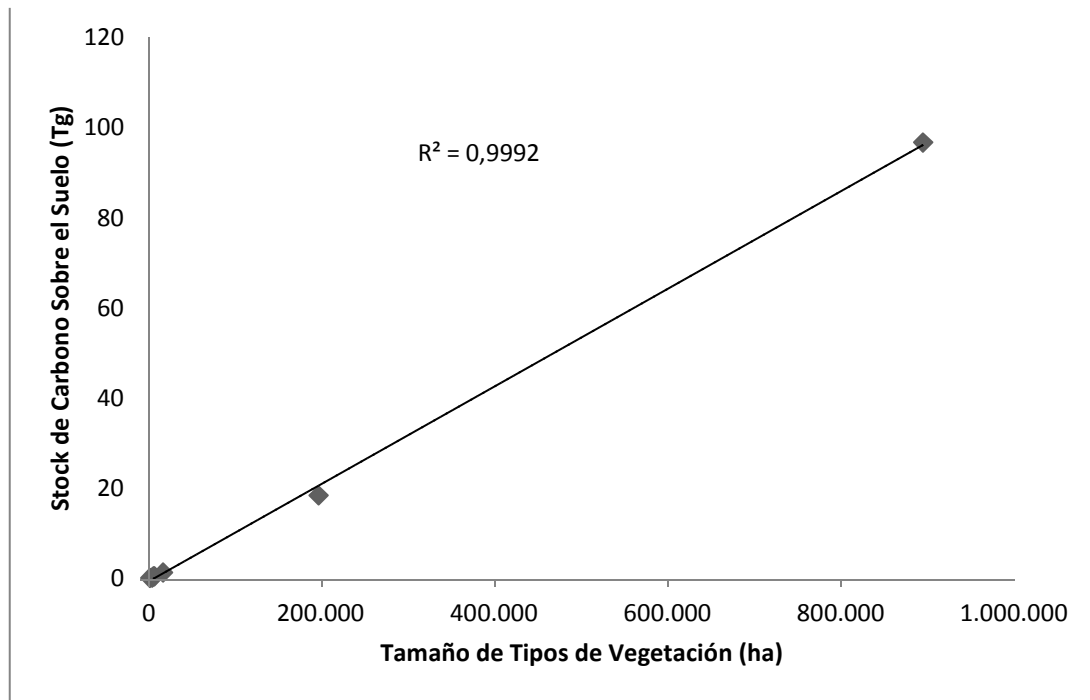
## 5.4 CARBONO EN LOS TIPOS DE VEGETACIÓN

En la tabla 4 se muestra la densidad de carbono sobre el suelo de los siete tipos de vegetación de los BHAS-PNM. Un total de 118 Tg (Tg = millón de toneladas métricas) de carbono se encuentran almacenadas en la vegetación de esta ecorregión, un 74,9% del total estimado de *stock* de carbono sobre el suelo del Parque Nacional del Manu (MINAM, 2014).

**Tabla 4.** Media y desviación estándar de la estimación de densidad de carbono sobre el suelo y total de stock de carbono sobre el suelo en los tipos de vegetación de los bosques húmedos de la Amazonia suroccidental del Parque Nacional del Manu. SD = desviación estándar, Mg C ha<sup>-1</sup> = Megagramos de carbono por hectárea, Tg = Teragramo = un millón de toneladas métricas.

Tipo de Vegetación	Área (ha)	Media de la Densidad de Carbono (Mg C ha <sup>-1</sup> )	SD de la Densidad del Carbono (Mg C ha <sup>-1</sup> )	Total Stock de Carbono (Tg C)	% del Total Stock de Carbono
PHDG	4 135	70,1	29,8	0,290	0,246
BSAA	6 911	81,7	24,7	0,564	0,478
PSHA	16 869	82,4	20,2	1,389	1,177
ADOM	1 612	86,9	13,8	0,140	0,119
BMTI	196 279	94,1	19,4	18,467	15,640
VGCA	5 740	88,0	24,9	0,505	0,428
BCLA	894 674	108,1	12,8	96,718	81,913

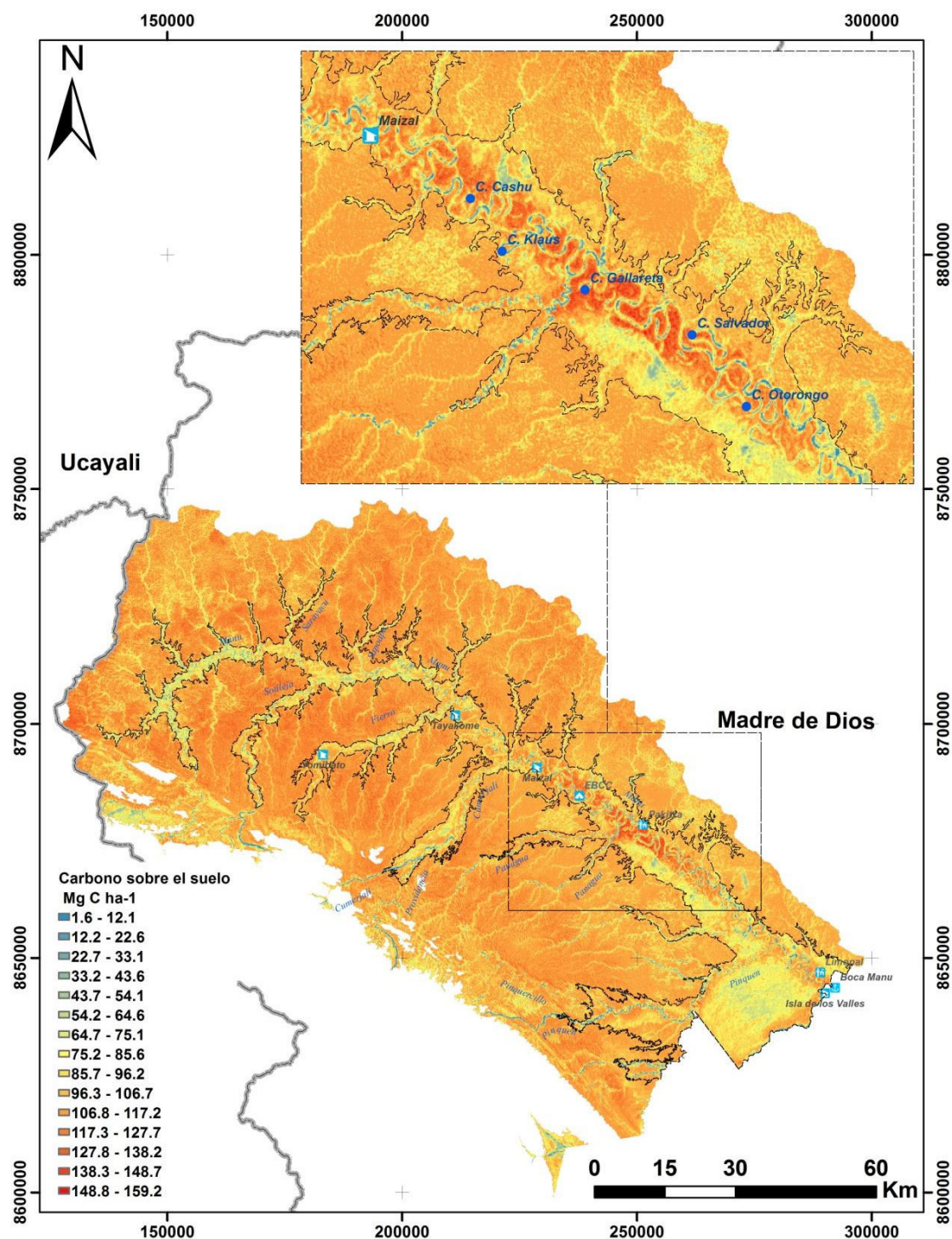
Los stocks más grandes se encuentran en los bosques de colinas de la llanura amazónica (tierra firme) y bosques maduros de tierras inundables (planicie aluvial). Entre ambos comprenden el 97,6% del total de los *stocks* de carbono sobre el suelo de los siete tipos de vegetación evaluados. Asimismo, se encuentra una alta correlación entre la extensión de los tipos de vegetación con los *stocks* de carbono sobre el suelo ( $R^2=0,99$ ; Figura 21).



**Figura 21.** Correlación entre el tamaño de los tipos de vegetación de los bosques húmedos de la Amazonia suroccidental del Parque Nacional del Manu y el total de su almacenaje de carbono sobre el suelo.

El mapa de carbono mostró una enorme gama de valores de densidad de carbono en los tipos de vegetación.

La distribución de los *stocks* de carbono, en la clase de los bosques de colinas de la llanura amazónica, se incrementa desde el sureste al noroeste, y en áreas no erosionadas por ríos o quebradas. Mientras que los *stocks* más altos de la planicie aluvial se distribuyen en la parte media de la cuenca, donde se registran valores máximos de hasta 159,2 megagramos de carbono por hectárea (Figura 22).



**Figura 22.** Distribución de los *stocks* de carbono sobre el suelo de los bosques húmedos de la Amazonia suroccidental del Parque Nacional del Manu.

## 6 DISCUSIÓN

### 6.1 VALIDACIÓN DE LA CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE VEGETACIÓN DE LOS BHAS-PNM

La precisión global de clasificación lograda en este estudio fue de 73,37% (Tabla 5). Actualmente no existe un acuerdo sobre los límites aceptables de cuan preciso debe ser una clasificación en orden de calificarlo como fiable, pero usualmente una precisión global mayor a 70% es aceptable (Salovaara *et al.*, 2005; Foody, 2002; Thomlinson *et al.*, 1999; Smits *et al.*, 1999).

Los cálculos de los diferentes tipos de errores, mostraron diferentes resultados para cada tipo de clase. En primer lugar, no existió ninguna precisión de productor o usuario para la clase VGCA, indicando que es muy probable que este tipo de vegetación pudiera ser en realidad parte de los bosques de colinas de llanura amazónica (BCLA). Sin embargo, es necesario señalar que no se tomaron puntos de control de campo para esta clase, debido a la inaccesibilidad de algunos sectores del parque, además, las imágenes de alta resolución, utilizadas para tomar los puntos de referencia, no cubrían las áreas donde esta clase era mayor, las cuales se localizaban entre la cuenca media y baja del área de estudio. Segundo, la precisión de usuario para la clase BMTI fue de solo 50%, indicando que la mitad de las unidades de muestras asignadas a dicha clase podría en realidad pertenecer a otros tipos de clase. Del mismo modo ocurriría para la clase PSHA, la cual solo mostró un 60% de precisión de usuario. Tercero, los valores más altos de precisión de usuario para las clases ADOM, BSAA y BCLA podrían indicar que dichas clases lograrían clasificarse con poco riesgo de confusión con las otras clases y viceversa. Finalmente, es necesario precisar qué; cuantas más clases de vegetación son reconocidas, la probabilidad de cometer error por asignaciones de clases se incrementa (Saalovara *et al.*, 2005). El presente estudio incluyó siete tipos de clases. Por otro lado, los tipos de vegetación que son claramente diferentes estructuralmente, son intrínsecamente más fáciles de separar que aquellos

estructuralmente similares. Algunos de los tipos de vegetación en este estudio fueron estructuralmente bastante homogéneos o similares unos con otros, como, por ejemplo; la clase PHDG que comprende comunidades vegetales hidromórficas y cuyos límites de distribución de cada zona son bastante similares a las comunidades vegetales de la clase PSHA. También la fase de transición de la clase BSAA con el BMTI, con árboles más vigorosos y dosel más desarrollado.

**Tabla 5.** Precisiones alcanzadas y proporción de puntos de referencia

<b>Tipo de Vegetación</b>	<b>Precisión Productor %</b>	<b>Precisión Usuario %</b>	<b>Proporción de puntos de referencia</b>
<b>PHDG</b>	27,5	68,75	6,87
<b>BSAA</b>	60,78	83,78	8,76
<b>PSHA</b>	39,77	61,4	15,12
<b>ADOM</b>	70,45	91,18	7,56
<b>BMTI</b>	87,16	50	18,73
<b>VGCA</b>	0	0	3,26
<b>BCLA</b>	96,97	90,32	39,69
<b>Global</b>	PG %	73,37	
	Kappa	0,64	

El índice kappa (k), con un valor de 0,64, mostró una considerable correlación con la realidad o exactitud temática del mapa producido (Tabla 6), donde el 64% de las clasificaciones son mejores que las esperadas al azar.

**Tabla 6.** Índice Kappa y concordancia con la realidad.

<b>Coeficiente de Kappa (K)</b>	<b>Fuerza de Concordancia</b>
<b>0,00</b>	Pobre
<b>0,01 – 0,20</b>	Leve
<b>0,21 – 0,40</b>	Aceptable
<b>0,41 – 0,60</b>	Moderada
<b>0,61 – 0,80</b>	Considerable
<b>0,81 – 1,00</b>	Casi perfecta

No es sencilla la comparación de los resultados del presente estudio con otros similares ya que la definición y el número de clases de vegetación reconocidas, son únicos en cada estudio. La escala espacial y el diseño de muestreo, son factores que también varían entre estudios. Y desafortunadamente, algunos de estos no brindan información del diseño de muestreo o cálculos de precisión, haciendo difícil la tarea de comparación. Atendiendo a estas limitaciones, algunas comparaciones fueron realizadas.

Muy pocos estudios han tratado de separar, florísticamente, los tipos de vegetación definidos dentro de los bosques primarios de la Amazonia suroccidental. Salo *et al.* (1986) emplearon imágenes Landsat MSS para clasificar visualmente bosques en sucesión primaria en toda la Amazonia peruana (para este estudio la clase de Bosque Sucesional Arbustivo–Arbóreo). En otros estudios se evaluó la heterogeneidad paisajística de los bosques de tierra firme en el área de Yasuní, Ecuador (Tuomisto *et al.*, 2003a) y en Sucusari, Perú (Tuomisto *et al.*, 2003b), relacionando los patrones de distribución de grupos de Melastomataceae y Pteridophyta con patrones de reflectancia de imágenes Landsat MSS y TM. Los resultados mostraron una alta correlación de las variables, permitiendo concluir que los patrones de reflectancia en las imágenes satelitales pueden ser usados para predecir patrones edáficos y

florísticos en los bosques de Tierra Firme. Sin embargo, en todos los casos, ningún tipo de análisis para evaluar la precisión similar al presente estudio fue usado. Por lo cual, no es posible hacer las comparaciones de precisión con nuestros resultados.

En el año 2015, fue publicado el “Mapa Nacional de Cobertura Vegetal”, un estudio desarrollado por el Ministerio del Ambiente en el cual se muestra la clasificación de la cobertura vegetal a nivel nacional basado en criterios geográficos, bioclimáticos, fisionómicos y fisiográficos. Para este estudio se emplearon imágenes del sensor TM del Landsat-5 del año 2011, modelos de elevación digital e imágenes de alta resolución espacial. La clasificación de la cobertura vegetal se realizó principalmente a través del reconocimiento visual de patrones de forma, textura, tamaño, color, entre otros. Es importante señalar que, solo fueron empleados 657 puntos de verificación para validar el mapa resultante, de los cuales, ninguno estuvo dentro de nuestra área de estudio (Figura 23). En resumen, 15 tipos de vegetación fueron clasificados para los bosques húmedos de la Amazonia suroccidental.

En la tabla 7, se muestra la comparación de la clasificación realizada en el “Mapa Nacional de Cobertura Vegetal” del MINAM con la hecha en el presente estudio. Se observó que, la clasificación de la unidad fisiográfica de “tierra firme” fue separada en 9 clases por el MINAM y solo en 2 clases en nuestro estudio. De las 9 clases, 6 (entre bosques de colinas, terrazas y montañas) son equivalentes a los bosques de colinas de la llanura amazónica (BCLA), en nuestro estudio, y los 3 restantes, asociados a la dominancia de *Guadua* sp. o “paca”, son equivalentes a los bosques de colinas de la llanura amazónica y vegetación de gramíneas de colinas de la llanura amazónica (VGCA), en nuestro estudio. Por otro lado, la planicie aluvial fue dividida en 5 clases en ambos estudios, sin embargo, la distribución espacial y el tamaño de las clases es diferente entre ambos, por ejemplo, en la clasificación realizada por el



**Figura 23.** Puntos de verificación del Mapa Nacional de Cobertura Vegetal. Cuadro rojo muestra la localización del área de estudio. Fuente: MINAM, 2015.

MINAM, el tipo de vegetación de los bosques en sucesión primaria (bosque sucesional arbustivo-arbóreo, BSAA, en el presente estudio) que se encuentra en las playas de los ríos y que son originados por la dinámica fluvial, no son clasificados, a pesar que estos son bosques muy importantes para la regeneración forestal (Salo *et al.*, 1986; Foster, 1990a). Asimismo, se observó que algunos parches de comunidades de aguajales fueron omitidos, mientras que otros fueron exagerados en tamaño con respecto a nuestro estudio (Figura 24).

Todas estas diferencias de clasificación y distribución de los tipos de vegetación en el “Mapa Nacional de Cobertura Vegetal” es debido a la escala del mapa, la cual es demasiado pequeña, si se desea analizar la vegetación en un área del tamaño del parque nacional del Manu ya que no brinda muchos detalles. Además, la interpretación



visual del mosaico de las imágenes satelitales a nivel nacional puede conducir a la mala interpretación de algunas coberturas vegetales en áreas no inundadas, comunidades de altura o “tierra firme”, ya que estas presentan limitaciones para expresar o traducir el grado de variabilidad ambiental en estas superficies (BIODAMAZ, 2004a).

**Tabla 7.** Comparación de la clasificación de los tipos de vegetación del presente estudio con el “Mapa Nacional de Cobertura Vegetal”.

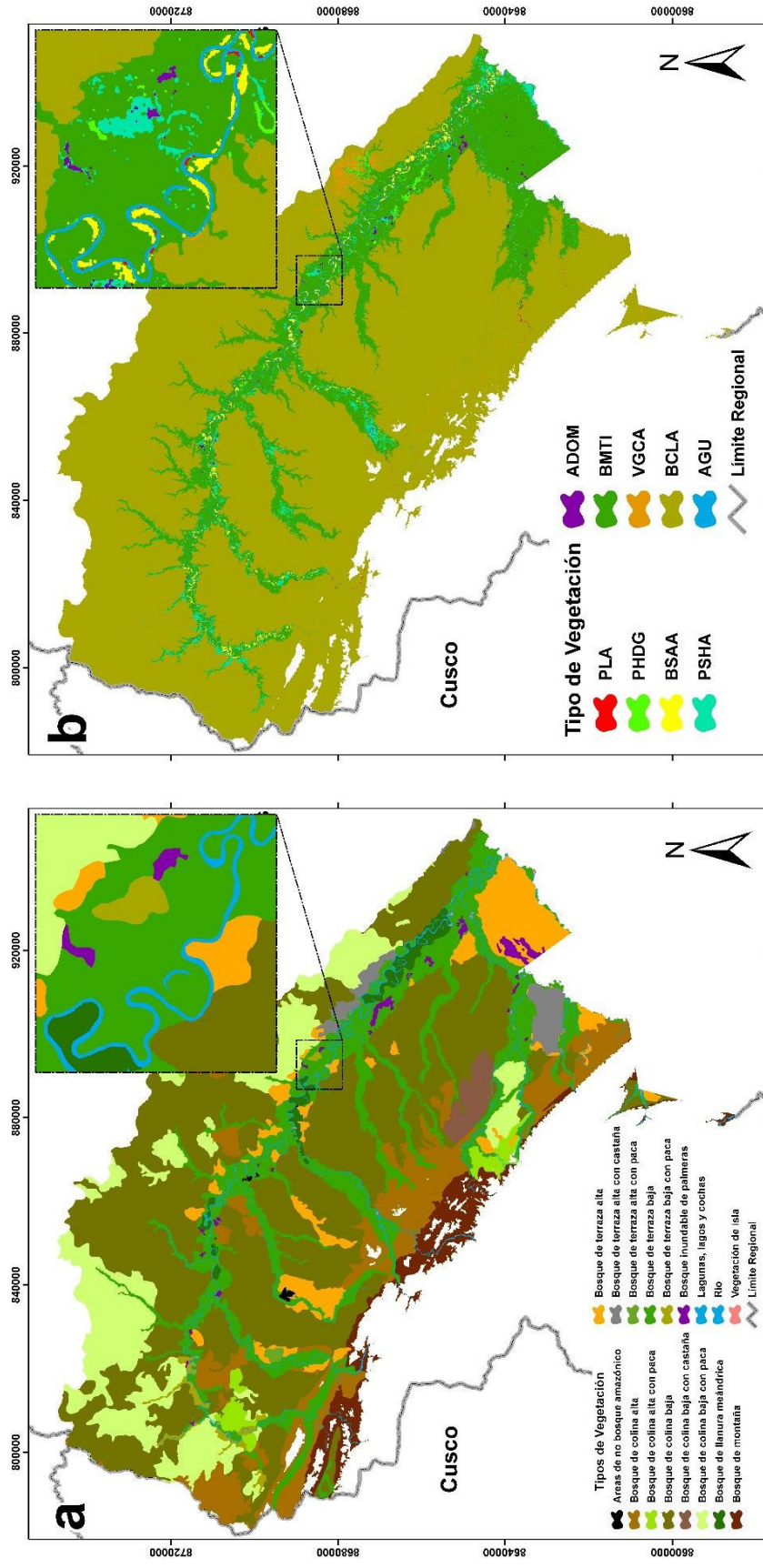
Tierra Firme		Planicie Aluvial		Otros	
MINAM	Presente Estudio	MINAM	Presente Estudio	MINAM	Presente Estudio
Bosque de Colina Alta	BCLA	Bosque de Terraza Baja	BMTI / BSAA	Áreas de No Bosque Amazónico	PHDG
Bosque de Colina Baja		Bosque de Llanura Meándrica			
Bosque de Terraza Alta		Bosque Inundable de Palmeras	ADOM		
Bosque de Montaña		Bosque de Terraza Baja con Paca	PSHA / PHDG		
Bosque de Terraza Alta con Castaña		Vegetación de Isla	BSAA		
Bosque de Colina Baja con Castaña					
Bosque de Colina Alta con Paca	BCLA / VGCA				
Bosque de Colina Baja con Paca					
Bosque de Terraza Alta con Paca					

Finalmente, en el mapa realizado por el MINAM se determinó la clase de áreas de no bosque amazónico, la cual es equivalente a la clase de pantanos herbáceos con dominancia de gramíneas en nuestro estudio. Esta, sin embargo, pertenece a los bosques talados de los alrededores de comunidades Machiguengas dentro del parque, la cual viene expandiéndose con el aumento de la población nativa. En este caso, las imágenes de cobertura fraccional mostraron amplios valores de vegetación no fotosintética que está relacionada a la presencia de vegetación de gramíneas que dominan espacios de bosque una vez que han sido talados.

En otros países con bosques amazónicos, la clasificación de bosques estacionalmente inundables y bosques maduros de llanura en la Amazonia boliviana, han sido correctamente separados usando imágenes Landsat TM, alcanzando valores de precisión global de 94-98% con ocho tipos de cobertura de suelo (agua, pantanos, y distintas clases de sabanas y bosques tropicales) (Lobo & Gullison, 1998). Asimismo, la clasificación de tres tipos de bosque sucesional y una clase de bosque maduro en la Amazonia brasileña, alcanzaron una precisión global de 78% (con el rango de precisión de productor de 58-99%) (Lu *et al.*, 2003).

Otros estudios emplearon distintos métodos de clasificación. Trisurat *et al.* (2000) usaron el método de clasificación supervisada con imágenes Landsat TM para discriminar vegetación herbácea y seis clases de bosques en Tailandia, obteniendo una precisión global de 79%.

Nuestros resultados mostraron una razonable precisión de clasificación comparados con otros estudios, a pesar que se hayan considerado siete clases y que algunas de ellas no fueran estructuralmente disimilares.



**Figura 24.** Comparación de la clasificación de los tipos de vegetación en ambos estudios. **a)** Tomado del “Mapa Nacional de Cobertura Vegetal” (MINAM, 2005), **b)** Presente estudio

## 6.2 CARBONO EN LOS TIPOS DE VEGETACIÓN

Los stocks más altos de carbono sobre el suelo se encuentran en la clase BCLA que se localiza en la unidad fisiográfica de bosques de tierra firme con buen drenaje y con suelos pobres en nutrientes (SERNANP, 2013), 96,7 Tg C. A pesar que la vegetación de esta unidad fisiográfica debería ser más antigua que la planicie aluvial, ya que esta última tuvo una reciente formación de los depósitos aluviales holocénicos, su apariencia superficial conlleva a una impresión opuesta. Terborgh (1990), en *Four Neotropical Rainforest*, señala que estos bosques presentan frecuentes caídas de árboles que da como resultado un dosel de baja estatura y un sotobosque enmarañado con lianas. Además, casi una tercera parte del terreno está ocupado por parches de bambú *Guadua* sp. dentro de los cuales los árboles están dispersos o ausentes (Terborgh, 1983). Entonces, este alto valor de carbono no se relacionaría por la antigüedad de su vegetación, sino más bien, por la gran extensión que presenta este tipo de vegetación (894 674 ha).

En la unidad fisiográfica de planicie aluvial, los stocks más altos se encuentran en la clase BMTI con 18,5 Tg C. A pesar que esta clase sea la segunda con mayor extensión (196 279 ha), la alta cantidad de carbono se debería a las características de sus suelos ricos en nutrientes (Gentry, 1985; 1986; Foster, 1990b). Particularmente, se puede observar que los mayores stocks de carbono sobre el suelo por hectárea son encontrados en un segmento de la planicie aluvial comprendida entre la comunidad nativa de Maizal y la Cocha Otorongo de la cuenca media del río Manu, 120 - 159 Mg C ha<sup>-1</sup> (Figura 22). Por otro lado, los stocks más bajos son encontrados en las clases de pantanos y asociaciones de aguajales 1 – 43,6 Mg C ha<sup>-1</sup>. Mientras que stocks intermedios están presentes en las planicies aluviales de la cuenca alta y baja, entre los ríos Pinquen y Alto Madre de Dios.

## 7 CONCLUSIONES

- Los análisis de datos SRTM e imágenes del sensor OLI del Landsat-8 bajo un nuevo enfoque de procesamiento semi-automatizado, han demostrado que son herramientas adecuadas para clasificar y determinar la distribución de los tipos de vegetación de los Bosques Húmedos de la Amazonía Suroccidental del Parque Nacional del Manu.
- Los datos topográficos resultantes de la imagen SRTM, modelo de elevación digital, y las imágenes de cobertura fraccional con el programa CLASlite, permitieron generar nuevos datos útiles para la clasificación de la vegetación.
- El índice Kappa mostró una considerable correlación de la exactitud temática del mapa producido con la realidad, con el 64% de las clasificaciones mejores que esperadas al azar.
- Se lograron altas precisiones de clasificación para la clase de Aguajales Densos o Mixtos (ADOM), 70,5% precisión de productor y 91,2% precisión de usuario. Muy importante para el mapeo de los aguajales de la Amazonia suroccidental.
- Es muy posible que la clase de Vegetación de Gramíneas de Colinas de la Llanura Amazónica (VGCA) pertenezca, en realidad, a la clase de Bosques de Colinas de la Llanura Amazónica (BCLA), debido a la baja precisión de clasificación encontrada.
- El mapa de stock de carbono sobre el suelo del Perú fue útil para estimar la cantidad de carbono por tipo de vegetación.
- Los stocks de carbono sobre el suelo, más grandes en el Parque Nacional del Manu, se encuentran en las clases de Bosques de Colinas de la Llanura Amazónica (BCLA) y Bosques Maduros de Terrazas estacionalmente Inundables (BMTI).

## 8 RECOMENDACIONES

- Se recomienda emplear el sistema de clasificación elaborado en el presente estudio para mapear los distintos tipos de vegetación que se encuentran en los bosques húmedos de la Amazonia suroccidental, debido a la considerable precisión obtenida.
- Se recomienda tomar más puntos de control de campo, principalmente en la cuenca media y baja, a fin de mejorar la validación de la clase de vegetación de gramíneas de colinas de la llanura amazónica (VGCA).
- Debido a los altos valores de precisión, se recomienda mapear independientemente la clase de aguajales densos y mixtos (ADOM) y ampliar la escala a un nivel regional.
- Se recomienda evitar métodos de clasificación de coberturas vegetales digitalizadas manualmente y por el contrario emplear métodos supervisados o no supervisados basados en algoritmos, que permitan seguir un monitoreo espacio-temporal.
- Se recomienda el empleo de imágenes satelitales de mediana-alta resolución espacial para el mapeo de las coberturas vegetales a la escala del Parque Nacional del Manu.

## 9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abell, R., Thieme, M.L., Revenga, C., Bryer, M., Kottelat, M., Bogutskaya, N., Coad, B., Mandrak, N., Balderas, S.C., Bussing, W., Stiassny, M.L.J., Skelton, P., Allen, G.R., Unmack, P., Naseka, A., Sindorf, R.N., Robertson, J., Armijo, E., Higgins, J.V., Heibel, T.J., Wikramanayake, E., Olson, D., López, H.L., Reis, R.E., Lundberg, J.G., Sabaj Pére, M.H., & Petri, P. (2008). Freshwater Ecoregions of the World: A New Map of Biogeographic Units for Freshwater Biodiversity Conservation. *BioScience*, 58, 403– 414.
- Anderson, L.O., Malhi, Y., Ladle, R.J., Aragão, L.E.O.C., Shimabukuro, Y., Phillips, O.L., Baker, T.R., Costa, A.C.L., Espejo, J.S., Niguchi, N., Laurance, W.F., López-González, G., Monteagudo, A., Nuñez-Vargas, P., Peacock, J., Quesada, C.A., & Almeida, S. (2009). Influence of landscape heterogeneity on spatial patterns of wood productivity, wood specific density and above ground biomass in Amazonia. *Biogeosciences*, 6, 1883–1902.
- Asner, G.P. & Heidebrecht, K.B. (2002). Spectral unmixing of vegetation, soil and dry carbon in arid regions: Comparing multi-spectral and hyperspectral observations. *International Journal of Remote Sensing*, 23, 3,939-3,958.
- Asner, G.P., Keller M., Pereira R.Jr., Zweede J.C. & Silva J.N.M. (2004). Canopy damage and recovery following selective logging in an Amazon forest: Integrating field and satellite studies. *Ecological Applications*, 14, 280-298.
- Asner, G.P., Páez G., Knapp D., Balaji A. & Clark J. (2009). Sistema Amigable de Monitoreo de la Deforestación y Perturbación de Bosques Tropicales CLASlite®. Guía del usuario, versión 2.0. Departamento de Ecología Global. Institución Carnegie para la Ciencia. 260 Panama Street, Stanford, CA 94305 USA.
- Asner, G.P. (2009). Tropical forest carbon assessment: Integrating satellite and airborne mapping approaches. *Environmental Research Letters*, 4, 034009.

- Asner, G.P., Powell, G.V.N., Mascaro, J., Knapp, D.E., Clark, J.K., Jacobson, J., Kennedy-Bowdoin, T., Balaji, A., Paez-Acosta, G., Victoria, E., Secada, L., Valqui, M., & Flint Hughes, R. (2010). High-resolution forest carbon stocks and emissions in the Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 85, 156–159.
- Asner, G.P. (2013). Geography of forest disturbance. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110, 3711–3712.
- Asner, G.P., Knapp, D.E., Martin, R.E., Tupayachi, R., Anderson, C.B., Mascaro, J., Sinca, F., Chadwick, K.D., Higgins, M., Farfan, W., Llactayo, W., & Silman, M. (2014). Targeted carbon conservation at national scales with high-resolution monitoring. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111, 5016–5022.
- Balslev, H., Luteyn, J., Øllgaard, B., & Holm-Nielsen, L.B. (1987). Composition and structure of adjacent unflooded and floodplain forest in Amazonian Ecuador. *Opera Botanica*, 92, 37-57.
- Beard, J.S. (1946). *The Natural Vegetation of Trinidad*. Oxford at the Clarendon Press, Oxford, Gran Bretaña, 1-92.
- BIODAMAZ. (2004a). Diversidad de vegetación de la Amazonía peruana expresada en un mosaico de imágenes de satélite. Documento Técnico 12. Serie BIODAMAZ-IIAP. Iquitos, Perú.
- BIODAMAZ. (2004b). Manual para elaboración de mosaicos de imágenes de satélite Landsat TM para la selva baja peruana. Documento Técnico 03. Serie BIODAMAZ-IIAP. Iquitos, Perú.
- Braun-Blanquet, J. (1979). *Fitosociología: Bases para el Estudio de las Comunidades Vegetales*. H. Blume Ediciones, Madrid, España, 820 pp.



- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M.A., Chambers, J.Q., Eamus, D., Fölster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, J.-P., Nelson, B.W., Ogawa, H., Puig, H., Riéra, B., & Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145, 87-99.
- Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. 3ª Edición revisada. Madrid, España.
- Clark, D. & Kellner, J. (2012). Tropical forest biomass estimation and the fallacy of misplaced concreteness. *Journal of Vegetation Science*, 23(6), 1191-1196.
- Congalton, R.G. (1991). A review of assessing the accuracy of classification of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37, 35-46.
- Duivenvoorden, J.F. & Lips, J.M. (1995). A land-ecological study of soils, vegetation, and plant diversity in Colombian Amazonía. *Tropenbos*, 12, 1-438.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI), (2014). ArcGIS Desktop Help 10.2 Geostatistical Analyst. <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.2/index.html>
- Foody, G. M. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 80, 185– 201.
- Foster, R.B., Arce J.B., & Wachter, T.S. (1986). Dispersal and sequential plant communities in Amazonian Peru floodplain. In A. Estrada and T.H. Fleming (eds.) *Frugivores and Seed Dispersal*. W. Junk. Dordrecht, pp. 357-370.
- Foster, R. B. (1990a). Long-term change in the successional forest community of the Rio Manu floodplain. *Four Neotropical rainforests*. Yale Univ. Press, New Haven, CT, 565-572.
- Foster, R. B. (1990b). The floristic composition of the Rio Manu floodplain forest. *Four neotropical rainforests*, 99-111.

- Gentry, A.H. (1982). Patterns of neotropical plant species diversity. *Evolutionary Biology*, 15, 1–84.
- Gentry, A.H. (1985). Algunos resultados preliminares de estudios botánicos en el Parque Nacional del Manu. In M. A. Ríos (ed.), *Reporte Manu. Centro de Datos para la Conservación, Universidad Agraria La Molina, Perú*, 2, 1–24.
- Gentry, A.H. (1986). Sumario de Patrones fitogeográficos neotropicales y sus implicaciones para el desarrollo de la Amazonía. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, 16, 101-116.
- Gentry, A.H. (1988a). Changes in plant community diversity and floristic composition on environmental and geographical gradients. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 75, 1–34.
- Gentry, A.H. (1988b). Tree species richness of upper Amazonian forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 85, 156–159.
- Gond, V., Freycon, V., Molino, J.-F., Brunaux, O., Ingrassia, F., Joubert, P., Pekel, J.-F., Prévost, M.-F., Thierron, V., Trombe, P.-J., & Sabatier, D. (2011). Broad-scale spatial pattern of forest landscape types in the Guiana Shield. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13, 357-367.
- Grández, C., García, A., Duque, A., & Duivenvoorden, J.F. (2001). La composición florística de los bosques en las cuencas de los ríos Ampiyacu y Yaguashyacu (Amazonía peruana). En: Duivenvoorden, J.F., Balslev, H., Cavelier, J., Grández, C., Tuomisto, H. & Valencia, R. (eds). *Evaluación de recursos vegetales no maderables en la Amazonía noroccidental*. IBED, Universiteit van Amsterdam, Amsterdam, Países Bajos, 163-176.

- Higgins, M.A., Ruokolainen, K., Tuomisto, H., Llerena, N., Cardenas, G., Phillips, O.L., Vasquez, R., & Rasanen, M. (2011). Geological control of floristic composition in Amazonian forests. *Journal of Biogeography*, 38, 2136–2149.
- Hill, R.A. & Foody, G.M. (1994). Separability of tropical rainforest types in the Tambopata-Candamo Reserved Zone, Peru. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 2687–2693.
- Huber, J. (1906). La vegetation de la Vallee du Río Purus (Amazonie). *Bulletin de L'Herbier Boissier* 2 ser, 4 (4), 249-276.
- Hudson, W.D. & Ramn, C.W. (1987). Correct formulation of kappa coefficient of agreement. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53, 421-422.
- Jensen, J.R. (1996). *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*. 2nd. Ed., Prentice Hall Series in Geographic Information Science, Upper Saddle River, New Jersey.
- Kalliola, R., Salo, J., Puhakka, M., & Rajasilta, M. (1991a). New site formation and colonizing vegetation in primary succession on the western Amazon floodplains. *Journal of Ecology*, 79, 877-901.
- Kalliola, R., Puhakka, M., Salo, J., Tuomisto, H., & Ruokolainen, K. (1991b). The dynamics, distribution and classification of swamp vegetation in Peruvian Amazonía. *Annales Botanici Fennici*, 28, 225-239.
- Kalliola, R. & Puhakka, M. (1993). Geografía de la selva baja peruana. En: Kalliola, R., Puhakka, M. & Danjoy, W. (eds). *Amazonía peruana vegetación húmeda tropical en el llano subandino*. Proyecto Amazonía de la Universidad de Turku & Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales. Jyväskylä, Finlandia, 9-21.
- Kalliola, R., Puhakka, M., & Danjoy, W. (1993). *Amazonía Peruana vegetación húmeda tropical en el llano subandino*. Proyecto Amazonía de la Universidad

de Turku & Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales. Jyväskylä, Finlandia, 265 pp.

- Lindenmayer, D.B., Laurance, W.F., & Franklin, J.F. (2012). Global decline of large old trees. *Science*, 338, 1305-1306.
- Lobo, A., & Gullison, E. (1998). Mapping the tropical landscape of Beni (Bolivia) from Landsat TM imagery: Beyond the “forest/non-forest” legend. In F. Dalmeier, & J. Comiskey (Eds.), *Forest Biodiversity Research, Monitoring and Modelling* (pp. 159– 181). Paris’ UNESCO.
- Lu, D., Moran, E., & Batistella, M. (2003). Linear mixture model applied to Amazonian vegetation classification. *Remote Sensing of Environment*, 87, 456– 469.
- Lugo, A.E. & Scatena, F.N. (1996). Background and catastrophic tree mortality in tropical moist, wet, and rain forests. *Biotropica*, 28, 585-599.
- Malhi, Y., Baker, T.R., Phillips, O.L., *et al.* (2004). The above-ground coarse woody productivity of 104 neotropical forest plots. *Global Change Biology*, 10, 563–591.
- MINAM (2014). *La Geografía del Carbono en Alta Resolución del Perú*. Ministerio del Ambiente, Lima, Perú, 69 pp.
- MINAM (2015). *Mapa Nacional de Cobertura Vegetal*. Ministerio del Ambiente, Lima, Perú, 108 pp.
- NUS. (2002). Centre for Remote Imaging, Sensing and Processing (CRISP), National University of Singapore (NUS), Spot Asia Pte. Ltda. *Principles of Remote Sensing*. <http://sci-ctr.edu.sg/ssc/publication/remotesense/rms1.htm>.
- Olson, D.M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E.D., Burgess, N.D., Powell, G.V.N., Underwood, E.C., D’amico, J.A., Itoua, I., Strand, H.E., Morrison, J.C., Loucks, C.J., Allnutt, T.F., Ricketts, T.H., Kura, Y., Lamoreux, J.F., Wettengel,

- W.W., Hedad, P., & Kasem, K.R. (2001). Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth. *BioScience*, 51(11), 933– 938.
- Peacock, J., Baker, T.R., Lewis, S.L., Lopez-Gonzalez, G., & Phillips, O.L. (2007). The RAINFOR database: Monitoring forest biomass and dynamics. *Journal of Vegetation Science*, 18, 535–542.
  - Pérez, J. D. (2007). Introducción a los Sensores Remotos-Aplicaciones en Geología. Laboratorio de Tectónica Andina, Ciudad Universitaria, Pabellón 2, C1428EGA, Buenos Aires, Argentina, pp.27-30.
  - Phillips, O. L., Hall, P., Gentry, A. H., Sawyer, S. A. & Vásquez, R. (1994). Dynamics and species richness of tropical forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 91, 2805–2809.
  - Phillips, O. L., Malhi, Y., Higuchi, N., *et al.* (1998). Changes in the carbon balance of tropical forest: evidence from long-term plots. *Science*, 282, 439–442.
  - Phillips, O. L., Nuñez, V.P., Lorenzo, M.A., Peña, C.A., Chuspe, Z.M.E., Galiano, S.W., Yli-Halla, M., & Rose, S. (2003). Habitat association among Amazonian tree species; a landscape-scale approach. *Journal of Ecology*, 91, 757–775.
  - Phillips, O. L., Aragão, L. E. O. C., Lewis, S. L. *et al.* (2009). Drought sensitivity of the Amazon rainforest. *Science*, 323, 1344–1347.
  - Phillips, O. L., van der Heijden, G., Lewis, S.L., López-González, G., *et al.* (2010). Drought mortality relationships for tropical forests. *New Phytologist*, 187, 631–646.
  - Räsänen, M., Salo, J., Jungner, H., & Romero Pittman, L. (1990). Evolution of the Western Amazon lowland relief: impact of Andean foreland dynamics. *Terra Nova*, 2, 320-332.

- Räsänen, M. (1993). La geohistoria y geología de la Amazonía peruana. En: Kalliola, R., Puhakka, M. & Danjoy, W. (eds.). Amazonía peruana vegetación húmeda tropical en el llano subandino. Proyecto Amazonía de la Universidad de Turku & Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales. Jyväskylä, Finlandia. pp. 43-67.
- Rodríguez, E., Morris, C.S., Belz, J.E., Chapin, E., Martin, J., Daffer, W., & Hensley, S. (2005). An assessment of the SRTM topographic products. Technical Report JPL D-31639. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, 143 pp.
- Rodríguez, E., Morris, C.S., & Belz, J.E. (2006). A global assessment of the SRTM performance. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72, 249–260.
- Ruokolainen, K. & Tuomisto, H. (1998). Vegetación natural de la zona de Iquitos. In *Geoecología y Desarrollo Amazonico: Estudio Integrado en la zona de Iquitos, Perú*; Kalliola, R., Flores, S., Eds.; *Annales Universitatis Turkuensis Ser A II*: Turku, Finland, 114, pp 253–365.
- Saatchi, S.S., Harris, N.L., Brown, S., Lefsky, M., Mitchard, E.T.A., Salas, W., Zutta, B.R., Buermann, W., Lewis, S.L., Hagen, S., Petrova, S., White, L., Silman, M., & Morel, A. (2011). Benchmark map of forest carbon stocks in tropical region across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108, 9899–9904.
- Salo, J., Kalliola, R., Häkkinen, I., Mäkinen, Y., Niemelä, P., Puhakka, M., & Coley, P.D. (1986). River dynamics and the diversity of Amazon lowland forest. *Nature*, 322, 254-258.
- Salovaara, K.J., Thessler, S., Malik, R.N., & Tuomisto, H. (2005). Classification of Amazonian primary rain forest vegetation using Landsat ETM plus satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 97, 39–51.

- SERNANP. (2013). Plan Maestro. Parque Nacional del Manu 2013-2018. 138pp.
- Shimwell, D.W. (1971). Description & Classification of Vegetation. Sidgwick & Jackson Biology Series. Londres, Gran Bretaña, 322 pp.
- Smits, P. C., Dellepiane, S. G., & Schowengerdt, R. A. (1999). Quality assessment of image classification algorithms for land-cover mapping: A review and a proposal for a cost-based approach. *International Journal of Remote Sensing*, 20, 1461–1486.
- Story, M. & Congalton, R.G. (1986). Accuracy assessment: a user's perspective. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52, 397-399.
- ter Steege, H., Pitman, N. C. A., Phillips, O. L. *et al.*, (2006). Continental-scale patterns of canopy tree composition and function across Amazonia. *Nature*, 443, 444–447.
- Terborgh, J. (1983). *Five New World Primates: A study in Comparative Ecology*. Princeton Univ. Press, Princeton, New Jersey, USA.
- Terborgh, J. (1990). An Overview of Research at Cocha Cashu Biological Station: Pp 48 – 59 *in* A.H. Gentry, editor. *Four neotropical rainforest*. Yale University Press, New Haven, Connecticut, USA.
- Thessler, S., Ruokolainen, K., Tuomisto, H., & Tomppo, E. (2005). Mapping gradual landscape-scale floristic changes in Amazonian primary rain forests by combining ordination and remote sensing. *Global Ecology and Biogeography*, 14, 315–325.
- Thomlinson, J. R., Bolstad, P. V., & Cohen, W. B. (1999). Coordinating methodologies for scaling landcover classifications from site-specific to global: Steps toward validating global map products. *Remote Sensing of Environment*, 70, 16–28.

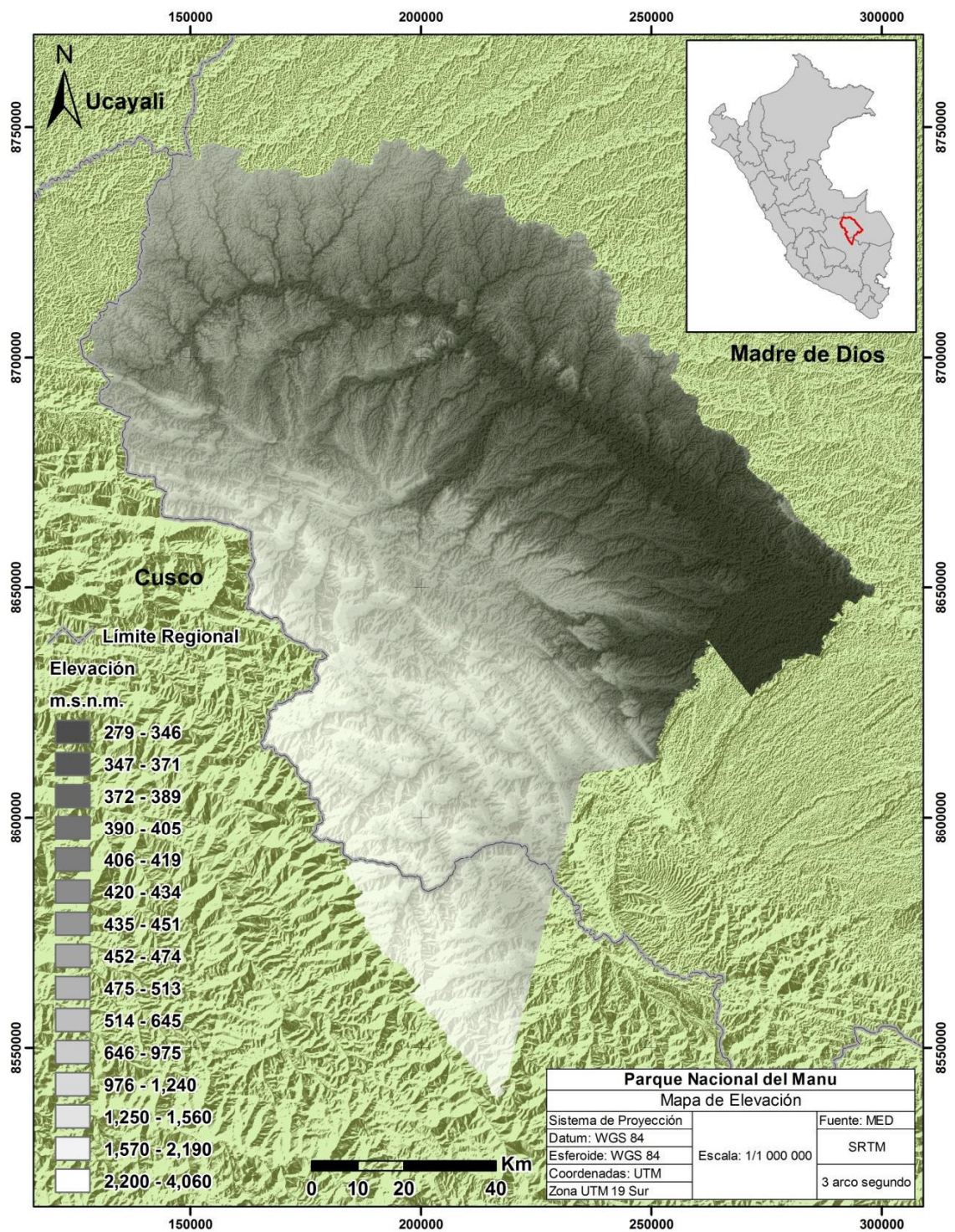
- Trisurat, Y., Eiumnoh, A., Murai, S., Hussain, M. Z., & Shrestha, R. P. (2000). Improvement of tropical vegetation mapping using remote sensing technique: A case of Khao Yai National Park, Thailand. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 2031–2042.
- Tucker, C.J., Grant, D.M., & Dykstra, J.D. (2004). NASA's global orthorectified Landsat data set. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70, 313–322.
- Tuomisto, H. (1993). Clasificación de vegetación en la selva baja peruana. En: Kalliola, R., Puhakka, M. & Danjoy, W. (eds.). *Amazonía peruana vegetación húmeda tropical en el llano subandino*. Proyecto Amazonía de la Universidad de Turku & Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales. Jyväskylä, Finlandia. pp. 103-112.
- Tuomisto, H., Ruokolainen, K., Kalliola, R., Linna, A., Danjoy, W., & Rodríguez, Z. (1995). Dissecting Amazonian Biodiversity. *Science*, 269, 63-66.
- Tuomisto, H. & Ruokolainen, K. (2001). Variación de los Bosques Naturales en las Áreas Piloto a lo Largo de Transectos y en Imágenes de Satélite. In *Evaluación de Recursos Forestales no Maderables en la Amazonía Noroccidental*; Duivenvoorden, J.F., Balslev, H., Cavelier, J., Grández, C., Tuomisto, H., Valencia, R., Eds.; IBED, Universiteit van Amsterdam: Amsterdam, The Netherlands, pp. 63–96.
- Tuomisto, H., Poulsen, A.D., Ruokolainen, K., Moran, R.C., Quintana, C., Celi, J., & Canas, G. (2003a). Linking floristic patterns with soil heterogeneity and satellite imagery in Ecuadorian Amazonia. *Ecological Applications*, 13, 352–371.
- Tuomisto, H., Ruokolainen, K., Aguilar, M., & Sarmiento, A. (2003b). Floristic patterns along a 43-km long transect in an Amazonian rain forest. *Journal of Ecology*, 91, 743–756.



- Vermote, E.F., Tanre, D., Deuze, J.L., Herman, M., & Morcette, J.-J. (1997). Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: an overview. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*, 35, 675,686.
- Williams, D. (2004). *Landsat-7 Science Data User's Handbook*, National Aeronautics and Space Administration.
- Los mapas en esta tesis fueron creados usando el *software* ArcGIS® de la compañía Esri. ArcGIS® y ArcMap™ son de propiedad intelectual de Esri y son usados en este estudio bajo licencia. Copyright © Esri, todos los derechos reservados.
- Los análisis de los datos también fueron hechos usando ENVI® versión 4.7 de la compañía Exelis Visual Information Solutions.
- La imagen satelital *GeoEye-1* del área administrativa de la Estación Biológica de Cocha Cashu, fue usado en este estudio con permisos del zoológico de San Diego. © San Diego Zoo Global.

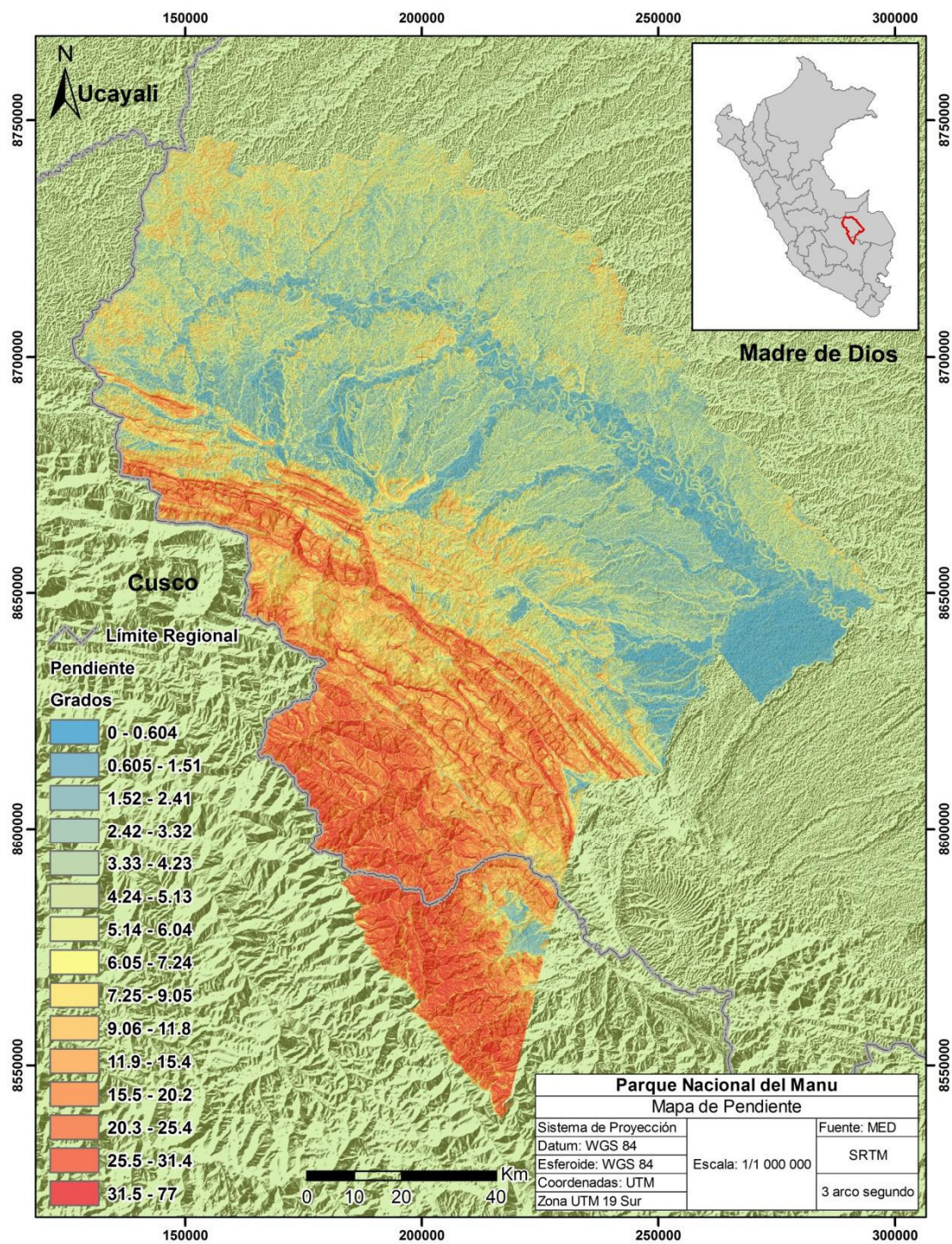
## **10 ANEXOS**

### **Anexo I: Mapas del Parque Nacional del Manu**



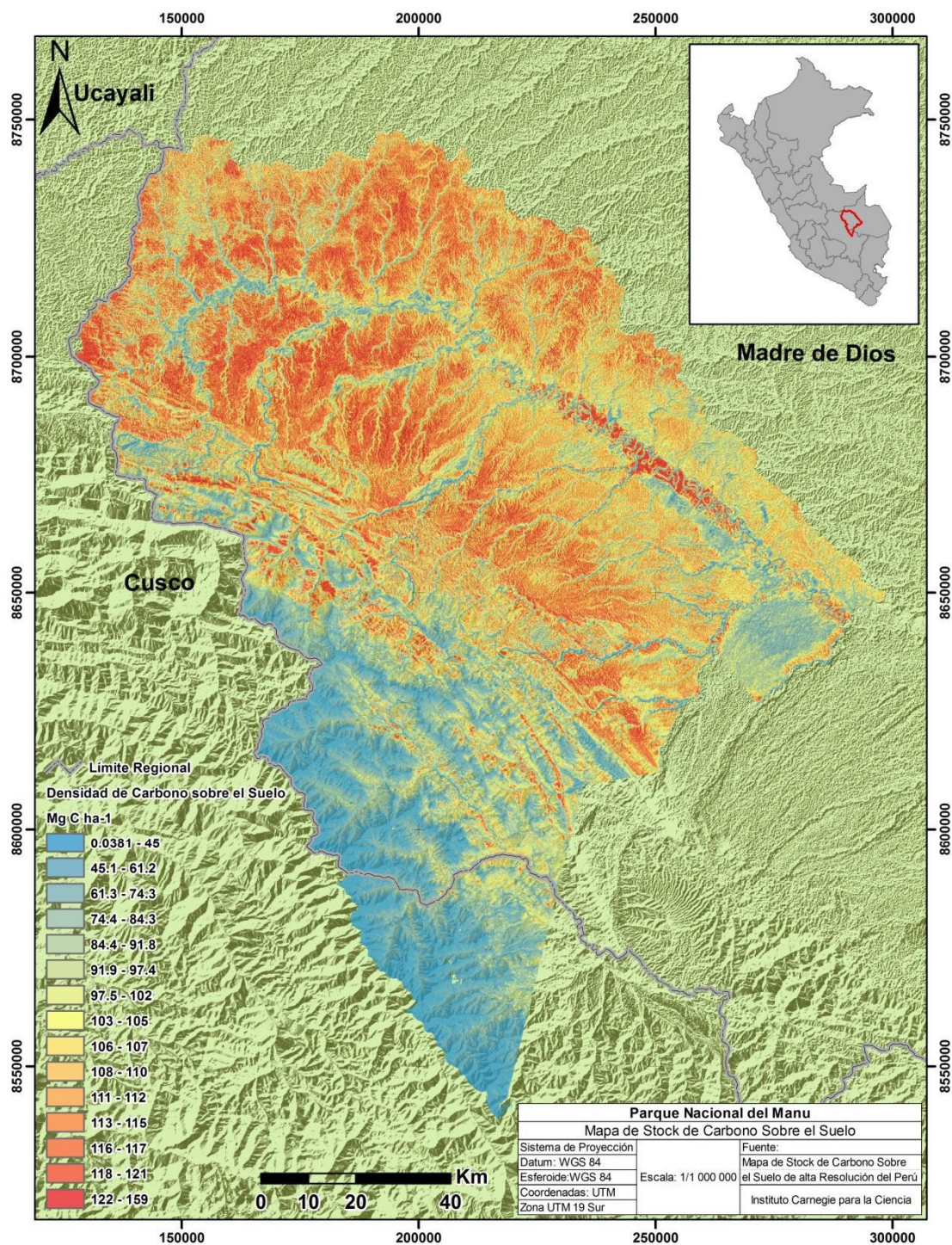
**Figura 25.** Elevación en metros sobre el nivel del mar del Parque Nacional del Manu.





**Figura 26.** Pendiente en grados con respecto a la horizontal del Parque Nacional del Manu.

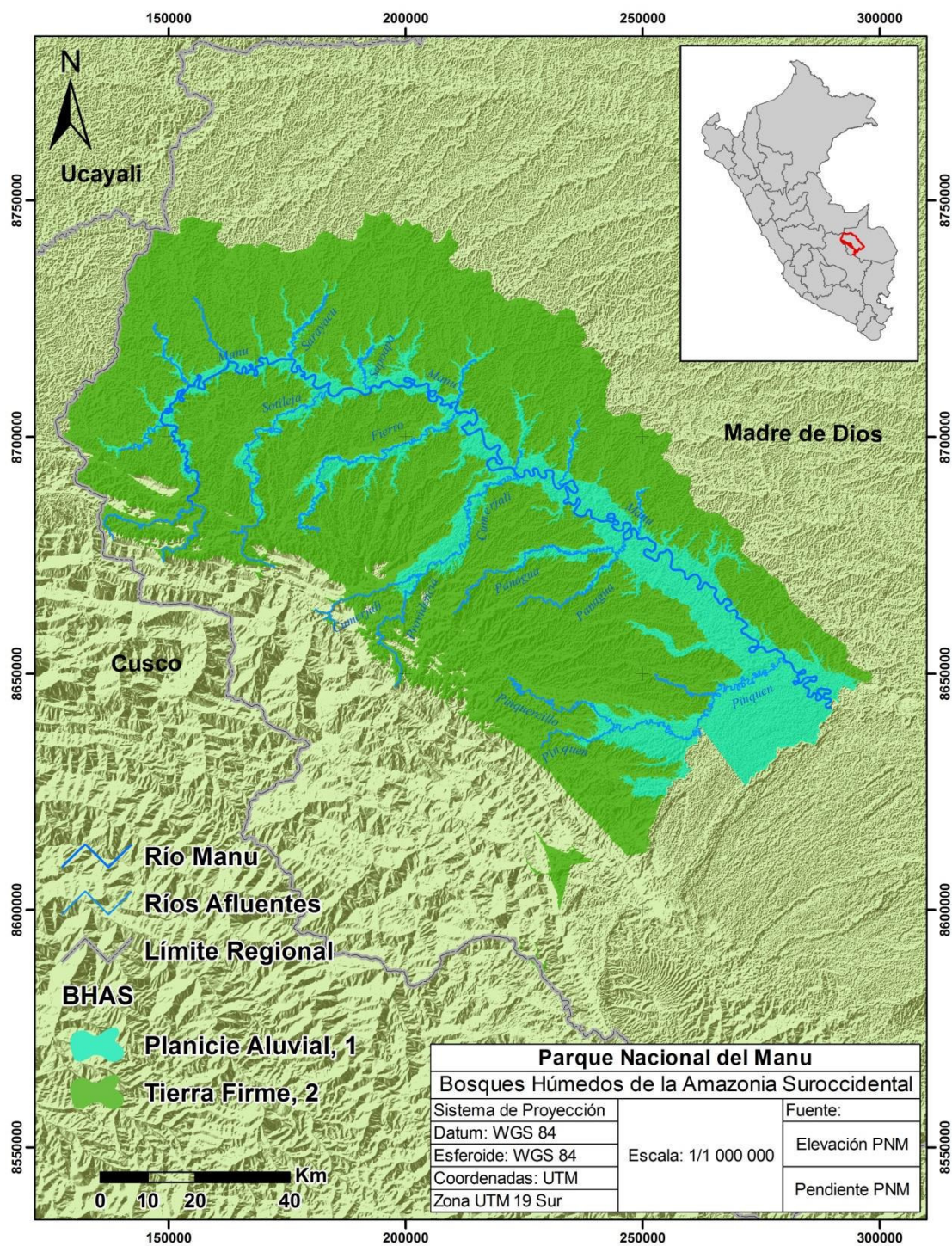




**Figura 27.** Densidad de Carbono sobre el suelo del Parque Nacional del Manu.

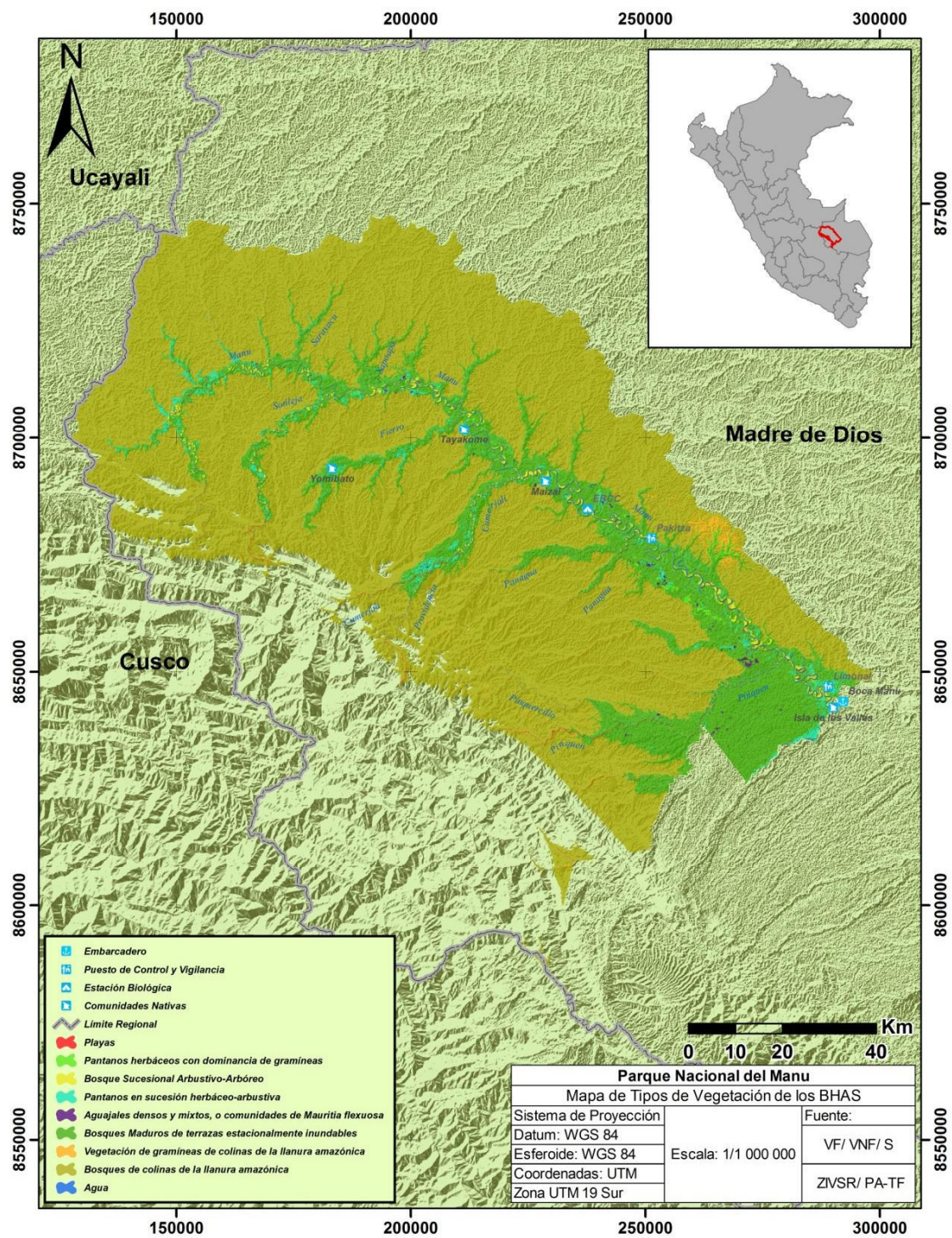
**Anexo II: Mapas de los Bosques Húmedos de la Amazonía Suroccidental del  
PNM**





**Figura 28.** Clasificación de Planicie Aluvial y Tierra Firme de los Bosques Húmedos de la Amazonia Suroccidental del Parque Nacional del Manu.





**Figura 29.** Tipos de Vegetación de los Bosques Húmedos de la Amazonía Suroccidental del Parque Nacional del Manu.



### **Anexo III: Datos de Puntos de Control de Campo**

Estación	N°	Punto Control	ADOM	BCLA	PACAL	BSAA	BMTI	PHDG	PSHA	VEGETACIÓN PREDOMINANTE (Avistamiento de campo)
EBCC	1	CTCOU101					X			<i>Guadua sp.</i> , <i>Attalea butyraceae</i> , "bombonaje", <i>Rinorea viridifolia</i>
	2	CTCOU102					X			<i>Heliconia sp.</i> , <i>Guadua sp.</i> , <i>Astrocaryum murumuru</i>
	3	CTCOU103					X		X	<i>Mauritia flexuosa</i> , <i>Iriartea deltoidea</i> , <i>Astrocaryum murumuru</i>
	4	CTCOU104					X			<i>Phytelephas sp.</i> , <i>Heliconia sp.</i> , <i>Astrocaryum murumuru</i> , <i>Annonaceae</i>
	5	CTCOU105					X			<i>Ficus sp.</i> , <i>Combretum sp.</i> , palmeras y arbustos
	6	CTCOU106					X			<i>Attalea butyraceae</i> , <i>Iriartea deltoidea</i> , <i>Socratea exorrhiza</i> , <i>Scheelea sp.</i>
	7	CTCOU107					X		X	<i>Ficus sp.</i> , <i>Combretum sp.</i> , palmeras y arbustos
	8	CTCOU108			X		X			<i>Guadua sp.</i> , palmeras
	9	CTCOU109				X			X	<i>Iriartea deltoidea</i> , <i>Gynenium sagittatum</i> , <i>Guadua sp.</i>
	10	CTCOU110					X			<i>Heliconia sp.</i> , palmeras
	11	CTCOU111					X		X	<i>Phytelephas sp.</i> , <i>Attalea sp.</i> , <i>Sapium sp.</i>
	12	CTCOU112					X		X	<i>Gynenium sagittatum</i> , <i>Heliconia sp.</i> , <i>Cecropia sp.</i> , <i>Calycophyllum sp.</i> , <i>Moraceae</i>
	13	CTCOU113		X						<i>Iriartea deltoidea</i> , <i>Astrocaryum murumuru</i> , <i>Phytelephas sp.</i>
	14	CTCOU114		X						<i>Sloanea obtusifolia</i> , <i>Rinorea viridifolia</i> , <i>Ziziphus sp.</i> , <i>Attalea butyraceae</i>
	15	CTCOU115					X			<i>Astrocaryum murumuru</i> , <i>Phytelephas sp.</i> , <i>Annonaceae</i>
	16	CTCOU116					X		X	Arbustos
	17	CTCOU117					X			<i>Ficus sp.</i> (Renacal)
	18	CTCOU118						X	X	Lianas, pastizal, palmeras
	19	CTCOU119	X							<i>Mauritia flexuosa</i> y <i>Heliconia sp.</i>
	20	CTCOU120					X			<i>Ficus sp.</i> , <i>Astrocaryum murumuru</i> , <i>Phytelephas sp.</i> , <i>Rinorea viridifolia</i>
	21	CTCOU121		X						<i>Scheelea sp.</i> , <i>Phytelephas sp.</i> , <i>Iriartea deltoidea</i>
	22	CTCOU122					X			<i>Heliconia sp.</i> , <i>Iriartea deltoidea</i> , <i>Attalea butyraceae</i> , <i>Annonaceae</i>
	23	CTCOU123					X			<i>Guadua sp.</i> , <i>Sorocea pileata</i> , <i>Duguetia quitarensis</i> ,



47	CTCOU217								X				<i>Dypterix micrantha</i> , <i>Sapium</i> sp., <i>Pseudolmedia</i> sp., <i>Chrysocalmys</i> sp., <i>Triplaris</i> sp.
48	CTCOU218								X				<i>Psitacanthus</i> sp., <i>Spondias monbin</i> , <i>Matisia cordata</i> , <i>Astrocaryum murumuru</i> , <i>Attalea</i> sp., <i>Mayna odorata</i> , helechos
49	CTCOU219								X				<i>Fevillea</i> sp.
50	CTCOU220				X								<i>Protium</i> sp., <i>Combretum</i> sp., <i>Phytalephas</i> sp., <i>Astrocaryum murumuru</i> , <i>Calophyllum spruceanum</i>
51	CTCOU221								X				<i>Terminalia amazonica</i> , <i>Miconia</i> sp., <i>Tabernamontana</i> sp.
52	CTCOU222								X				<i>Tectaria</i> sp., <i>Scheelea</i> sp.
53	CTCOU223								X				<i>Astrocaryum murumuru</i> , <i>Iriarteia deltoidea</i>
54	CTCOU224								X				<i>Theobroma cacao</i> , <i>Phytalephas</i> sp., <i>Ficus</i> sp.
55	CTCOU225								X	X			<i>Mauritia flexuosa</i> , <i>Attalea</i> sp., lianas
56	CTCOU226								X				<i>Mauritia flexuosa</i>
57	CTCOU227								X				<i>Spondias monbin</i> , <i>Dipteryx micrantha</i> , <i>Astrocaryum murumuru</i> , <i>Iriarteia deltoidea</i> , <i>Duguetia quitarensis</i> , <i>Combretum</i> sp., <i>Cissus ulmifolia</i> , <i>Otoba</i> sp., <i>Ficus</i> sp.
58	CTCOU228								X				<i>Dipterix micrantha</i> , <i>Mauritia flexuosa</i> , <i>Attalea</i> sp., arbustos
59	CTCOU229	X											<i>Triplaris americana</i> , <i>Mauritia flexuosa</i>
60	CTCOU230	X											<i>Mauritia flexuosa</i>

Leyenda: ADOM: Aguajales densos y mixtos, o comunidades de *Mauritia flexuosa* asociados con otras especies; BCLA: Bosques de colinas de la llanura amazónica; PACAL: Bosque Dominado por *Guadua*; BSAA: Bosque Sucesional Arbustivo-Arbóreo; BMTI: Bosques maduros de terrazas estacionalmente inundables; PHDG: Pantanos herbáceos con dominancia de gramíneas; PSHA: Pantanos en sucesión herbácea - arbustivo. Fuente: TEAM-network (Datos no publicados).

